Réviser son bac avec Le Monde

2021

SPÉCIALITÉ - TERMINALE

SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE

- L'ESSENTIEL DU COURS
- LES SUJETS INÉDITS
- LES ARTICLES DU *MONDE*
- LES CONSEILS DE RÉVISION

NOUVEAU PROGRAMME

Un cahier spécial de 16 pages pour se tester
+
Une carte mentale pour bien retenir

rue des écoles

Réviser son bac avec Le Monde

TERMINALE

SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE

Une réalisation de rue des écoles

NOUVEAU PROGRAMME

Un cahier spécial de 16 pages pour se tester
+
Une carte mentale pour bien retenir

Avec la collaboration de :
Marie-Noël Morin Ganet
Claudie Libersa

En partenariat avec MAIF

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Le programme de spécialité de sciences de la vie et de la Terre est organisé en trois grandes thématiques. L'objectif de la thématique « la Terre, la vie et l'organisation du vivant » est de montrer comment la science construit une explication cohérente de l'état de la Terre et du vivant, de leur fonctionnement et de leur histoire. Cette construction progressive fait appel à des méthodes de recherche et d'analyse rigoureuses fondées sur l'observation, l'expérimentation et la modélisation. L'évolution temporelle des deux objets d'études, le vivant et la Terre, constitue la notion essentielle à appréhender, en comprenant l'interdépendance entre l'histoire de la vie et celle de la Terre. La thématique « enjeux planétaires contemporains » permet d'appréhender par une véritable démarche scientifique quelques-uns des grands enjeux auxquels est confrontée l'humanité au XXIe siècle. L'objectif de la thématique « corps humain et santé » est d'étudier plusieurs de nos comportements, définis comme des ensembles de réactions observables en réponse à des stimulations.

Cet ouvrage, constitué de fiches de cours, de sujets corrigés et d'articles du *Monde*, a été conçu pour vous préparer efficacement au baccalauréat. À chaque chapitre correspond un cours de deux pages illustrées, complétées de zooms qui permettent d'approfondir certains aspects. Des sujets corrigés sont également proposés pour s'entraîner. Les articles du *Monde* qui accompagnent chaque chapitre permettent de mettre le cours en perspective avec un sujet d'actualité, ou en résonance avec la réflexion de spécialistes de la question. Ils permettent de faire ressortir les grands enjeux du programme et donnent des références originales et précises, utilisables à l'écrit comme à l'épreuve du Grand oral. Un guide pratique ainsi qu'une carte mentale complète la liste des outils mis à disposition des candidats.

L'enseignement de spécialité sciences de la vie et de la Terre présente trois objectifs majeurs : permettre aux élèves l'acquisition de connaissances et d'un raisonnement scientifique, sur la base d'une culture solide en biologie et géologie ; contribuer à la formation de leur esprit critique et participer à leur éducation de citoyen pour les préparer à appréhender les enjeux scientifiques du monde actuel ; les accompagner dans leur choix d'orientation, en leur présentant la diversité des formations et des métiers relevant des sciences de la vie et de la Terre.

Message à destination des auteurs des textes figurant dans cet ouvrage ou de leurs ayants-droit : si malgré nos efforts, nous n'avons pas été en mesure de vous contacter afin de formaliser la cession des droits d'exploitation de votre œuvre, nous vous invitons à bien vouloir nous contacter à l'adresse bucquet@lemonde.fr.

En partenariat avec MAIF

Complétez vos révisions du bac sur www.assistancescolaire.com :
méthodologie, fiches, exercices, sujets d'annales corrigés…
des outils gratuits et efficaces pour préparer l'examen.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Le Monde CAMPUS

A l'approche du baccalauréat 2021 et durant l'examen, Le Monde Campus vous propose des conseils de lectures et de révisions, des quiz, des directs avec des professeurs, ainsi que les sujets et corrigés des épreuves.

Toute l'année, nos journalistes racontent comment les étudiants et jeunes diplômés se forment, travaillent et changent la société.

Rendez-vous sur la rubrique **Lemonde.fr/campus** et dans *Le Monde* avec les pages « Le Monde Campus 021 » et les suppléments mensuels « Le Monde Campus ».

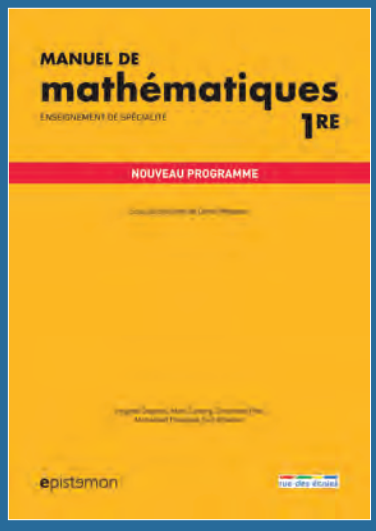
Le Monde CAMPUS |

NOUVEAU PROGRAMME

MANUELS DE MATHÉMATIQUES

Des manuels de mathématiques inédits, conformes aux nouveaux programmes et accessibles à tous.

- Une place très importante donnée aux démonstrations, au raisonnement et faisant appel à la créativité.
- De nombreux approfondissements permettant aux élèves ou à leurs professeurs de choisir des thèmes d'étude complémentaires.
- Une annexe dédiée à la programmation Python.



Cible : élèves de première et terminale
format : 17 x 24 cm | 368 pages | 19,50 €

Retrouvez toutes nos collections pour préparer le baccalauréat sur www.ruedesecoles.com

rue des écoles

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites

SOMMAIRE

Génétique et évolution p. 5

Chapitre 1 – L'origine du génotype des individus p. 06

Chapitre 2 – L'évolution des génomes et la diversité du vivant p. 08

À la recherche du passé géologique de notre planète p. 19

Chapitre 3 – Le temps et les roches p. 20

Chapitre 4 – Les traces du passé mouvementé de la Terre p. 22

De la plante sauvage à la plante domestiquée p. 27

Chapitre 5 – L'organisation fonctionnelle des plantes à fleurs p. 28

Chapitre 6 – La plante, productrice de matière organique p. 30

Chapitre 7 – Reproduction de la plante entre vie fixée et mobilité p. 32

Chapitre 8 – La domestication des plantes *(thème non évaluable à l'écrit)* p. 34

Les climats de la Terre : comprendre le passé pour agir aujourd'hui et demain p. 45

Chapitre 9 – Les variations climatiques passées et actuelles p. 46

Comportements, mouvement et système nerveux p. 53

Chapitre 10 – Les réflexes p. 54

Chapitre 11 – Cerveau et mouvement volontaire p. 56

Produire le mouvement : contraction musculaire et apport d'énergie p. 65

Chapitre 12 – La cellule musculaire : une structure spécialisée permettant son propre raccourcissement p. 66

Chapitre 13 – Origine de l'ATP dans la cellule musculaire p. 68

Chapitre 14 – Le contrôle des flux de glucose dans l'organisme p. 70

Comportements et stress : vers une vision intégrée de l'organisme p. 83

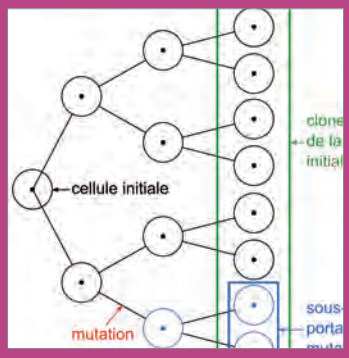
Chapitre 15 – L'adaptabilité de l'organisme et ses limites p. 84

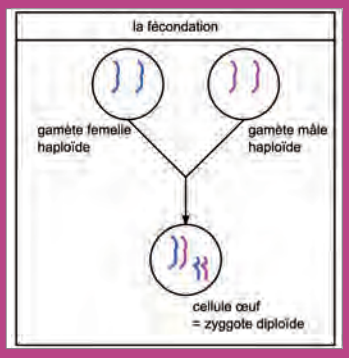
Le guide pratique p. 91

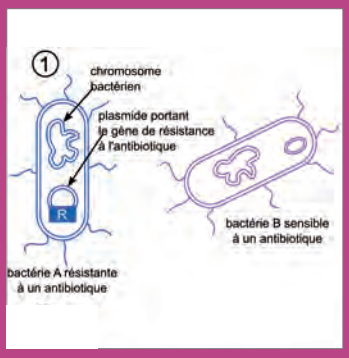
La carte mentale p. 94

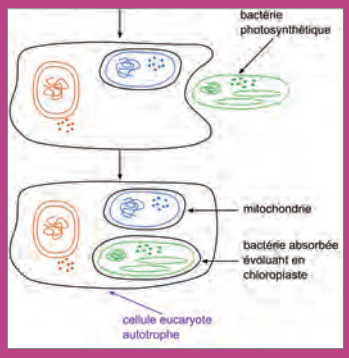
© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

GÉNÉTIQUE ET ÉVOLUTION









© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

L'origine du génotype des individus

Les cellules somatiques de l'individu, obtenues par mitoses à partir de la cellule-œuf, possèdent toutes la même information génétique (aux mutations près). Des cellules de la lignée germinale forment, par méiose, les gamètes qui permettent la reproduction sexuée de l'individu. Comment la reproduction sexuée est-elle à l'origine du génotype des individus ? Comment contribue-t-elle à la diversification du vivant ?

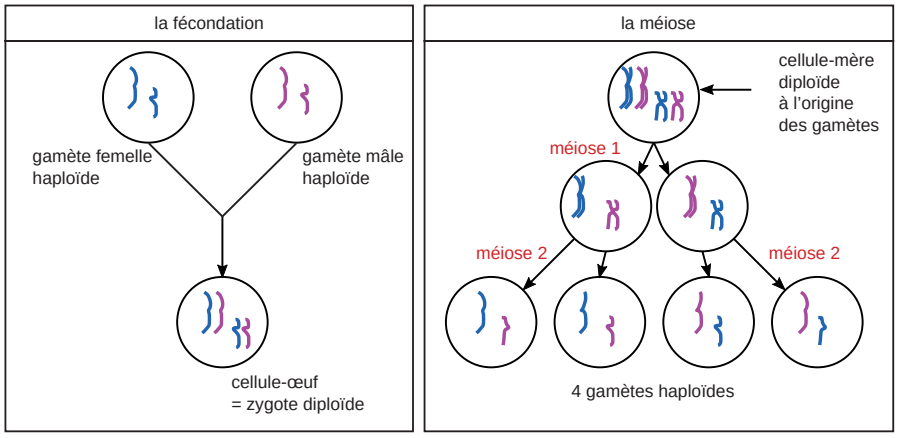
La conservation des génomes : stabilité génétique et évolution clonale

La succession de mitoses à partir d'une cellule initiale produit un **clone**, ensemble de cellules génétiquement identiques entre elles. Ces cellules héritent d'éventuelles mutations subies par la cellule initiale, et forment alors un **sous-clone mutant**. Tout accident génétique irréversible est transmis (s'il est viable) par mitoses à la descendance de la cellule. En l'absence d'échanges génétiques avec l'extérieur, la diversité génétique d'un clone résulte de l'accumulation de mutations successives.

Le brassage des génomes à chaque génération : la reproduction sexuée des eucaryotes

La **fécondation** est **l'union de deux gamètes**, mâle et femelle, **haploïdes** (chacun à n chromosomes, n étant spécifique de l'espèce) et forme une **cellule-œuf diploïde**, à $2n$ chromosomes. Les génomes des gamètes ont des origines indépendantes l'une de l'autre, et apportent chacun un lot d'allèles. Dans la cellule-œuf, chaque paire d'allèles est formée de **deux allèles identiques** (individu **homozygote**) ou de **deux allèles différents** (individu **hétérozygote**).

La méiose permet, à partir d'une cellule initiale diploïde, la formation de 4 gamètes haploïdes. Elle est précédée d'une **réplication de l'ADN**, au cours de laquelle les chromosomes passent de 1 à 2 chromatides. La méiose est une **suite de deux divisions cellulaires** : la **méiose 1** puis la **méiose 2**. Lors de la prophase de la méiose 1, les chromosomes homologues d'une même paire s'apparient. En métaphase 1, les chromosomes homologues se disposent de part et d'autre du plan équatorial de la cellule. En anaphase 1, chaque chromosome d'une paire migre de façon aléatoire vers l'un des pôles de la cellule. La télophase 1 aboutit à la formation de deux cellules haploïdes, à **n chromosomes à 2 chromatides** : chaque cellule contient un chromosome de chaque paire. Puis en **méiose 2**, dans chaque cellule formée, les chromatides de chaque chromosome se séparent et migrent chacune vers l'une des deux futures cellules filles. Chacun des gamètes est alors haploïde **(n chromosomes à 1 chromatide)** et contient une copie de chaque gène, soit la moitié de l'information génétique



La reproduction sexuée : fécondation et méiose.

ZOOM SUR…

CONVENTIONS D'ÉCRITURE EN GÉNÉTIQUE

En génétique, les différents allèles d'un gène sont désignés par une ou deux lettres. L'allèle dominant est écrit en majuscules ou porte le signe (+) en exposant, tandis que l'allèle récessif est écrit en minuscules ou ne porte pas de signe. Par exemple, chez la drosophile, les ailes peuvent être vestigiales (allèle vg) ou normales (allèle vg+). Le phénotype s'écrit entre crochets : une drosophile de phénotype [vg+] possède des ailes normales. Le génotype s'écrit entre parenthèses, et les deux allèles de l'individu sont séparés par deux traits, chacun représentant l'un des deux chromosomes homologues : le génotype d'une drosophile hétérozygote s'écrit (vg+//vg).

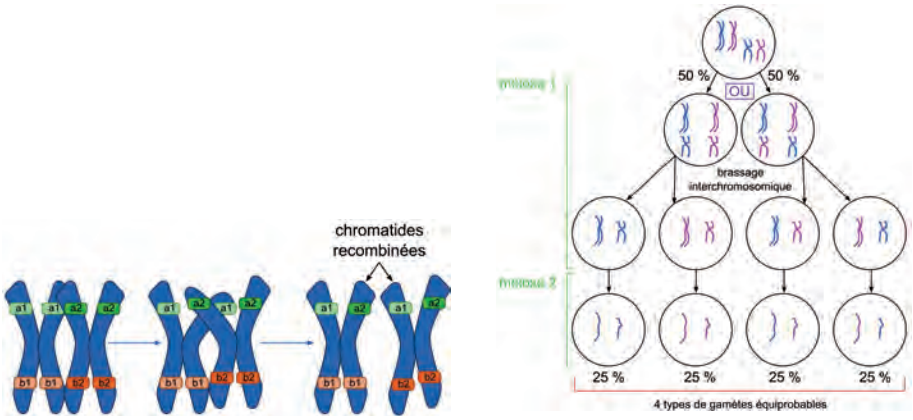
CROISEMENT-TEST OU *TEST-CROSS*

Croisement d'un individu présentant le phénotype dominant avec un individu homozygote récessif, c'est-à-dire porteur des allèles récessifs des gènes étudiés. L'étude du phénotype des descendants d'un croisement-test permet de connaître le génotype du parent ayant le phénotype dominant.

DOMINANCE ET RÉCESSIVITÉ

Lorsque les deux chromosomes homologues portent des allèles différents pour un même gène, l'allèle qui s'exprime au niveau du phénotype est qualifié d'allèle dominant (par rapport à l'autre allèle). L'allèle qui ne s'exprime pas au niveau du phénotype est dit récessif (par rapport à l'allèle dominant). Lorsque les deux allèles s'expriment conjointement, ils sont dits codominants.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.



Les brassages génétiques de la méiose.

de la cellule initiale. Chez un individu hétérozygote pour un gène étudié, chaque gamète reçoit **un seul des deux allèles de ce gène** avec une probabilité équivalente, égale à 50 %.
La méiose se caractérise par l'existence de **deux brassages génétiques** qui augmentent la diversité des gamètes produits. En **prophase 1,** l'accolement des deux chromosomes d'une même paire permet des **crossing-over**, des échanges réciproques et équilibrés de portions de chromatides entre deux chromatides appartenant à deux chromosomes homologues. Ce **brassage intrachromosomique** s'effectue lors de certaines méioses, avec une fréquence variable selon les gènes. En **métaphase 1**, la disposition de part et d'autre du plan équatorial des chromosomes d'une même paire s'effectue au hasard, conduisant en **anaphase 1** à une **combinaison aléatoire des chromosomes de chaque paire**.

Lors de la méiose, **l'étude de deux gènes**, présentant chacun deux paires d'allèles, chez un **individu hétérozygote** montre que les gamètes formés présentent **4 combinaisons d'allèles**. Si les deux gènes sont **indépendants** (situés sur deux chromosomes différents), le brassage interchromosomique aboutit à **4 gamètes équiprobables** (fréquence de 25 % chacun). Si les **deux gènes sont liés** (situés sur le même chromosome), le **brassage intrachromosomique** forme **quatre gamètes non équiprobables**. Le nombre de combinaisons génétiques possibles dans les gamètes est d'autant plus élevé que le nombre de gènes à l'état hétérozygote est plus grand chez les parents. La **reproduction sexuée**, c'est-à-dire la méiose et la fécondation, est à l'origine de la **diversité des génotypes des individus** d'une même espèce.

Les principes de base de la génétique

L'analyse génétique est l'étude de la **transmission héréditaire des caractères observables,** lors de croisements, souvent réalisés entre individus de **lignées pures** (homozygotes pour tous les caractères) et ne différant que par un nombre limité de caractères. Dans l'espèce humaine, **l'identification des allèles** portés par un individu repose d'abord sur une étude familiale. Le séquençage de l'ADN permet de connaître le génotype de chaque individu, de ses ascendants et descendants. Les bases de données informatisées permettent d'identifier des **associations entre certains gènes mutés et certains phénotypes**. Dans les études de type trio, la comparaison de l'ADN d'un sujet porteur d'une mutation avec celui de ses parents permet de savoir si l'enfant a hérité de l'allèle muté de l'un de ses parents ou si la mutation est apparue *de novo* chez l'enfant.

Les accidents génétiques de la méiose

Des **anomalies** peuvent survenir au cours de la méiose. Lors des **crossing-over inégaux**, des fragments de chromatides sont échangés de façon déséquilibrée entre chromosomes homologues. Les gamètes formés peuvent ainsi perdre ou gagner certains gènes. Dans certains cas, la **duplication de gènes** est à l'origine de la formation **de familles multigéniques**.

Un autre type d'anomalie est **l'absence de séparation** des deux chromosomes homologues en anaphase 1, ou des deux chromatides d'un chromosome en anaphase 2, ce qui entraîne l'absence d'un chromosome pour la moitié des gamètes et la présence d'un chromosome surnuméraire pour l'autre moitié. Après fécondation par un gamète normal, les cellules-œufs portent une **anomalie chromosomique** : soit une **monosomie** (un chromosome en moins), soit une **trisomie** (un chromosome en plus). Dans l'espèce humaine, ces anomalies chromosomiques sont fréquemment létales, mais certaines sont viables comme les trisomies 21, 18, et celles affectant les chromosomes sexuels (XXX, XXY ou XYY). D'un point de vue évolutif, les accidents lors de la méiose peuvent être source d'une **diversification importante des génomes.**

UN ARTICLE DU *MONDE* À CONSULTER

• Nous sommes tous des êtres mosaïques p. 14
(Florence Rosier, *Le Monde* daté du 12.06.2019)

DATES CLÉS

L'HISTOIRE DE LA GÉNÉTIQUE

1866 : Mendel, moine et botaniste, élabore les premières lois de la transmission des caractères héréditaires.
1879 : Fleming observe le comportement des chromosomes au cours de la mitose.
1888 : Strasburger observe le comportement des chromosomes au cours de la méiose.
1901 : De Vries introduit la notion de mutation.
1902 : Sutton et Boveri proposent que les chromosomes soient les porteurs de l'information génétique.
1906 : Johannsen introduit le terme « gène » pour désigner un facteur héréditaire.
1915 : Morgan apporte les preuves expérimentales de la théorie chromosomique de l'hérédité grâce à ses études sur les drosophiles.
1941 : Beadle et Tatum établissent qu'un gène est responsable de la synthèse d'une enzyme.
1944 : Avery, McLeod et McCarty découvrent que l'ADN est le support de l'information génétique chez la bactérie.
1953 : Watson et Crick élaborent le modèle de la structure en double hélice de l'ADN grâce aux travaux de Franklin.
1959 : Lejeune met en évidence l'anomalie chromosomique de la trisomie 21 (syndrome de Down).
1988 : Lancement du projet « Génome humain ».
2003 : Achèvement du séquençage complet du génome humain.
À partir des années 2000 : Mise en évidence de l'importance de l'épigénétique, c'est-à-dire des modifications de l'expression des gènes sans modification de la séquence de l'ADN. Ces modifications sont dépendantes de l'environnement de la cellule, elles sont réversibles et transmissibles à la descendance de la cellule.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Évolution des génomes et diversité du vivant

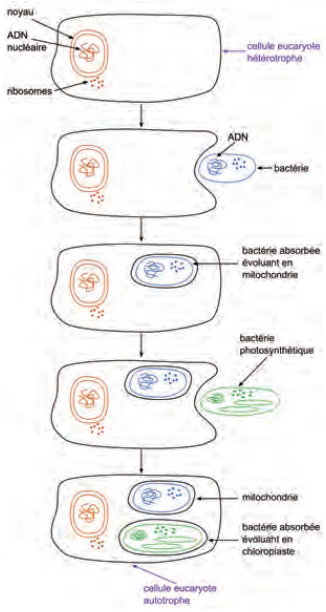
Les mutations, les brassages génétiques de la reproduction sexuée et les accidents lors de la méiose contribuent à la diversification du vivant. Quels autres mécanismes génétiques et non génétiques participent à cette diversification ?

La complexification des génomes : transferts horizontaux et endosymbioses

L'universalité de l'ADN, l'unicité de sa structure et la conservation des mécanismes d'expression génétique dans le vivant autorisent des **échanges génétiques entre organismes** même non apparentés. Les transferts de gènes parmi les **bactéries** sont fréquents et s'effectuent selon différentes modalités. Lors de la **transformation bactérienne**, la bactérie absorbe de l'ADN exogène présent dans son environnement et l'intègre dans son chromosome. Lors de la **transduction**, un virus infectant les bactéries (appelé bactériophage) transfère un fragment de chromosome bactérien d'une bactérie à une autre. Enfin, la **conjugaison bactérienne** consiste en un transfert unidirectionnel d'ADN plasmidique d'une bactérie donneuse à une bactérie receveuse. Les **plasmides** sont de petites molécules d'ADN circulaires présentes chez les bactéries. Leur transfert d'une bactérie à l'autre s'effectue grâce aux **pili** (poils) **sexuels** bactériens. Ainsi, lors ces transferts horizontaux de gènes, l'ADN transféré s'intègre dans le chromosome bactérien ou dans un plasmide : il est alors **transmissible** aux générations suivantes et peut permettre **l'acquisition de nouveaux caractères**. Ces transferts contribuent à la **diversité bactérienne** et ont des conséquences sur la santé humaine (résistance aux antibiotiques, par exemple).

Les transferts horizontaux de gènes existent aussi chez les autres êtres vivants. Par exemple, le **placenta**, annexe embryonnaire chez les Mammifères, est constitué de cellules fusionnées grâce à une protéine, la **syncytine**. Le gène de la syncytine des Mammifères provient d'un transfert horizontal d'un gène viral. Les transferts horizontaux de gènes ont donc des effets importants sur **l'évolution des populations et des écosystèmes**.

L'endosymbiose est une **symbiose** entre deux cellules dont l'une est contenue dans l'autre, chacune en retirant un **bénéfice**. Les **mitochondries** et les **chloroplastes**, organites des cellules eucaryotes, possédant leurs propres ADN et ribosomes, résultent **d'endosymbioses**. Au cours de l'évolution, **une cellule eucaryote a absorbé** une bactérie, qui a évolué en mitochondrie réalisant la respiration. Lors d'une autre endosymbiose, une cellule eucaryote hétérotrophe a absorbé une bactérie photosynthétique, devenue un chloroplaste, responsable de l'autotrophie de sa cellule hôte. Au cours du temps, certains des gènes de l'organite sont transférés dans le génome de la cellule hôte, entraînant la régression du génome de l'organite. Les génomes propres à ces organites constituent **l'hérédité cytoplasmique**, distincte du génome nucléaire et qui participe au **transfert génétique vertical** (transmission de l'information génétique de génération en génération). Les endosymbioses, qui ont eu lieu plusieurs fois dans l'histoire du vivant, permettent la reconstitution de phylogénies.



Endosymbioses : acquisition des mitochondries et chloroplastes par les cellules eucaryotes.

L'inéluctable évolution des génomes au sein des populations

Le **modèle de Hardy-Weinberg** prédit la fréquence des allèles et des génotypes dans une population au cours du temps. Sous certaines conditions, ce modèle établit qu'un

ZOOM SUR…

LA RÉSISTANCE AUX ANTIBIOTIQUES

Depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale, les antibiotiques sont utilisés pour lutter contre les infections bactériennes. Mais certaines bactéries sont même devenues insensibles : elles sont dites « résistantes » à ces antibiotiques. Certaines bactéries sont devenues résistantes à plusieurs antibiotiques : on parle alors de multirésistance. Une résistante à tous les antibiotiques est observée dans certains rares cas. La résistance aux antibiotiques peut apparaître par mutation, mais elle est souvent le résultat d'un transfert horizontal de gènes entre bactéries, notamment par conjugaison bactérienne. Des plasmides portant des gènes de résistance aux antibiotiques sont transférés d'une bactérie à une autre. La présence d'antibiotiques dans le milieu où vivent les bactéries exerce une pression de sélection sur ces bactéries, entraînant l'augmentation de la biorésistance. La résistance aux antibiotiques constitue un véritable enjeu de santé à l'échelle mondiale, car elle fait courir le risque de ne plus disposer d'antibiotiques efficaces pour lutter contre les infections bactériennes dans un avenir proche. L'un des moyens pour limiter cette résistance est d'alléger la pression de sélection en limitant l'utilisation des antibiotiques. Ils doivent être utilisés en santé humaine, seulement en cas de nécessité et sur des périodes de temps limité ; et l'agriculture, notamment l'élevage, doit restreindre drastiquement leur emploi.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

équilibre est atteint dans la population : **les fréquences alléliques et génotypiques sont stables d'une génération à l'autre**. Les conditions nécessaires à cet équilibre sont les suivantes : la **population** doit être **infinie**, doit appartenir à une **espèce diploïde** munie d'une **reproduction sexuée** avec **rencontre aléatoire** entre les **individus** d'une part, et entre les **gamètes** d'autre part ; la **ségrégation des allèles** lors de la méiose doit être **aléatoire** et les **mutations**, les **migrations** et la **sélection naturelle** sont inexistantes.

Équilibre du modèle de Hardy-Weinberg

Soit un gène autosomal (sur un chromosome non sexuel), présentant 2 allèles A et B dans une population d'adultes reproducteurs de la génération *n*, qui respecte les conditions du modèle de Hardy-Weinberg.

Fréquences génotypiques dans la population à la génération *n* :

f_n(A//A) : fréquence des individus homozygotes

f_n(A//B) : fréquence des individus hétérozygotes

f_n(B//B) : fréquence des individus homozygotes

Fréquences alléliques dans la population à la génération *n* :

fréquence de l'allèle A :

$$f_n(\text{A}) = f_n(\text{A//A}) + \frac{1}{2} f_n(\text{A//B}) = p$$

fréquence de l'allèle B :

$$f_n(\text{B}) = f_n(\text{B//B}) + \frac{1}{2} f_n(\text{A//B})$$

$$= q \text{ avec } p + q = 1.$$

Fréquences alléliques dans la population à la génération n +1 :

$$f_{n+1}(\text{A}) = f_{n+1}(\text{A//A}) + \frac{1}{2} f_{n+1}(\text{A//B}) = p^2 + pq$$

$$= p(p + q) = p = f_n(\text{A//A}) ;$$

$$f_{n+1}(\text{B}) = f_{n+1}(\text{B//B}) + \frac{1}{2} f_{n+1}(\text{A//B}) = q^2 + pq$$

$$= q(q + p) = q = f_n(\text{B//B}).$$

Échiquier de croisement des adultes reproducteurs à la génération n

		Gamètes mâles	
		Allèle A **Fréquence p**	**Allèle B** **Fréquence q**
Gamètes femelles	Allèle A Fréquence **p**	(A//A) fréquence : $\mathbf{p^2}$	(A//B) fréquence : **pq**
	Allèle B Fréquence **q**	(A//B) fréquence : **pq**	(B//B) fréquence = $\mathbf{q^2}$

Dans la population, les fréquences alléliques et les fréquences phénotypiques sont stables d'une génération à une autre.

Dans les populations réelles, différents facteurs empêchent d'atteindre cet équilibre théorique, entraînant **l'évolution de la diversité des populations au cours du temps**. Les **mutations** font apparaître de nouveaux caractères. La probabilité de transmettre les génotypes dépend du phénotype : **la sélection naturelle** modifie la fréquence des allèles selon l'environnement. La fréquence des allèles neutres évolue aléatoirement par **dérive génétique**, et la **taille finie** des populations peut entraîner ainsi la disparition d'allèles. Les **préférences sexuelles** des partenaires interviennent dans la rencontre entre les individus. Des migrations entraînent l'ajout ou le retrait de génotypes de la population. À cause de **l'instabilité de leur environnement,** des **différences génétiques** entre les populations d'une même espèce se produisent au cours du temps, limitant **les échanges réguliers de gènes** entre ces populations. Elles peuvent alors être isolées génétiquement les unes des autres et évoluer de manière indépendante, formant ainsi de **nouvelles espèces**. Les espèces peuvent être considérées comme des **populations d'individus suffisamment isolées génétiquement des autres populations**. Toutes les espèces apparaissent comme des **ensembles hétérogènes de populations, évoluant continuellement dans le temps**.

D'autres mécanismes contribuent à la diversité du vivant

Cette partie ne sera pas évaluée à l'épreuve écrite du baccalauréat.

Une diversification des êtres vivants est possible **sans modification de leur génome**, comme lors **d'associations non héréditaires, telles les symbioses ou le parasitisme**. Une autre modalité de diversification sans modification du génome chez les animaux est le recrutement **de composants inertes du milieu modifiant le phénotype**. Chez certaines espèces animales, des caractères comportementaux sont l'objet d'une transmission culturelle à l'intérieur des populations.

DEUX ARTICLES DU *MONDE* À CONSULTER

- Les plantes aussi échangent des gènes p. 15 (Hervé Morin, *Le Monde* daté du 22.02.2019)
- L'homme n'a pas le monopole de la culture p. 16 (Nathaniel Herzberg, *Le Monde* daté du 20.03.2019)

ZOOM SUR…

DIVERSIFICATION DU VIVANT : ASSOCIATIONS NON HÉRÉDITAIRES

La diversification du vivant peut s'effectuer par des associations non héréditaires, qui doivent être renouvelées à chaque génération, entre des individus d'espèces différentes. Dans le parasitisme, l'association est bénéfique au parasite mais néfaste à l'hôte parasité. Dans la symbiose, l'association est bénéfique pour chacun des deux partenaires. Les symbioses sont nombreuses : lichens (champignons et algues ou cyanobactéries), mycorhizes (champignons et racines des arbres), nodosités des Fabacées (bactéries fixatrices d'azote atmosphérique et racines de plantes), coraux (animaux et algues), microbiotes chez les animaux, dont l'être humain, etc. La symbiose permet l'acquisition de nouveaux caractères sans modification du génome.

DIVERSIFICATION DU VIVANT : PHÉNOTYPE ÉTENDU

Une autre modalité de diversification du vivant sans modification du génome est le recrutement de composants inertes du milieu modifiant le phénotype (constructions, parures, etc.). De plus, chez certains animaux, des comportements acquis peuvent être transmis par apprentissage, à l'intérieur d'une même génération ou d'une génération à l'autre, comme le chant des oiseaux, l'utilisation d'outils, et les éléments de culture notamment dans les sociétés humaines. Ces caractères comportementaux, qui constituent un phénotype qualifié d'étendu, sont transmissibles à la génération suivante et peuvent être soumis à la sélection naturelle, subissant ainsi une évolution au cours du temps.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Les anomalies chromosomiques, exercice 1

Le sujet (d'après bac S, 2019, Nouvelle-Calédonie)

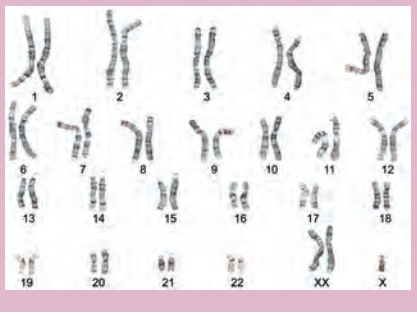
Simon est un jeune homme atteint du syndrome de Klinefelter : il possède des testicules de petite taille, dépourvus de spermatozoïdes. Son caryotype présente deux chromosomes X et un chromosome Y, alors que ses parents ont un caryotype ne présentant aucune anomalie.

Expliquez comment la méiose et la fécondation peuvent être à l'origine de ce caryotype.

Vous rédigerez un texte argumenté.

Il sera étayé par des expériences, des observations, des exemples.

Document de référence : Caryotype de Simon.



CE QU'IL NE FAUT PAS FAIRE

Traiter la méiose et la fécondation de manière générale au lieu d'étudier le cas particulier de Simon.

LA BONNE MÉTHODE

Argumenter

L'objectif dans l'exercice 1 est de répondre à une question scientifique à l'aide de connaissances, en fournissant une réponse argumentée et structurée. Plusieurs possibilités existent pour appuyer une argumentation :

- exploiter les informations présentes dans le(s) document(s) proposé(s) par le sujet ;
- présenter des exemples ou des expériences étudiés pendant l'année ;
- citer des faits liés à l'actualité, à condition qu'ils correspondent bien au sujet.

La réussite de l'exercice 1 nécessite de bien connaître non seulement les notions du cours, mais aussi des exemples, des observations ou des expériences, en les ayant sélectionnés pour leur intérêt et leur facilité à être mémorisés.

Utiliser les documents

Sans que cela soit obligatoire, l'exercice 1 peut contenir un ou plusieurs documents. Ils peuvent :

- présenter le contexte général du sujet ;
- illustrer un aspect du sujet ;
- apporter des informations que vous pouvez (ou devez) utiliser dans votre réponse en fonction des consignes de l'énoncé.

L'objectif n'est pas d'analyser le(s) document(s) dans leur intégralité comme dans l'exercice 2, mais si besoin, d'extraire des éléments intéressants pour répondre à la question scientifique posée. Les documents de l'exercice 1 constituent ainsi une aide, en apportant des informations sur le sujet à traiter et en vous orientant dans l'élaboration de votre réponse.

Le corrigé

Certains enfants présentent des phénotypes inhabituels dus à des anomalies du nombre de chromosomes, détectables lors de la réalisation d'un caryotype. Les phénotypes et les caryotypes des parents ne présentent généralement pas d'anomalies. Comment la méiose et la fécondation sont-elles à l'origine de ces anomalies du nombre de chromosomes ? Dans un premier temps, nous caractériserons l'anomalie chromosomique de Simon, puis nous expliquerons l'origine de celle-ci.

Simon présente un syndrome de Klinefelter, avec des testicules de petite taille et sans spermatozoïdes. Son caryotype montre la présence de 47 chromosomes au lieu de 46. Simon possède 22 paires d'autosomes et 3 chromosomes sexuels au lieu de 2 : 2 chromosomes X et 1 chromosome Y. Sa formule chromosomique est 47, XXY. Simon présente donc une anomalie du nombre de chromosomes sexuels, caractérisée par la présence d'un chromosome sexuel surnuméraire, à l'origine de son syndrome de Klinefelter. Or, les parents de Simon présentent chacun un caryotype normal : la formule chromosomique de la mère de Simon est 46, XX et celle de son père est 46, XY. Lors de la reproduction sexuée des parents de Simon, quels mécanismes ont été responsables de l'anomalie chromosomique de leur enfant ?

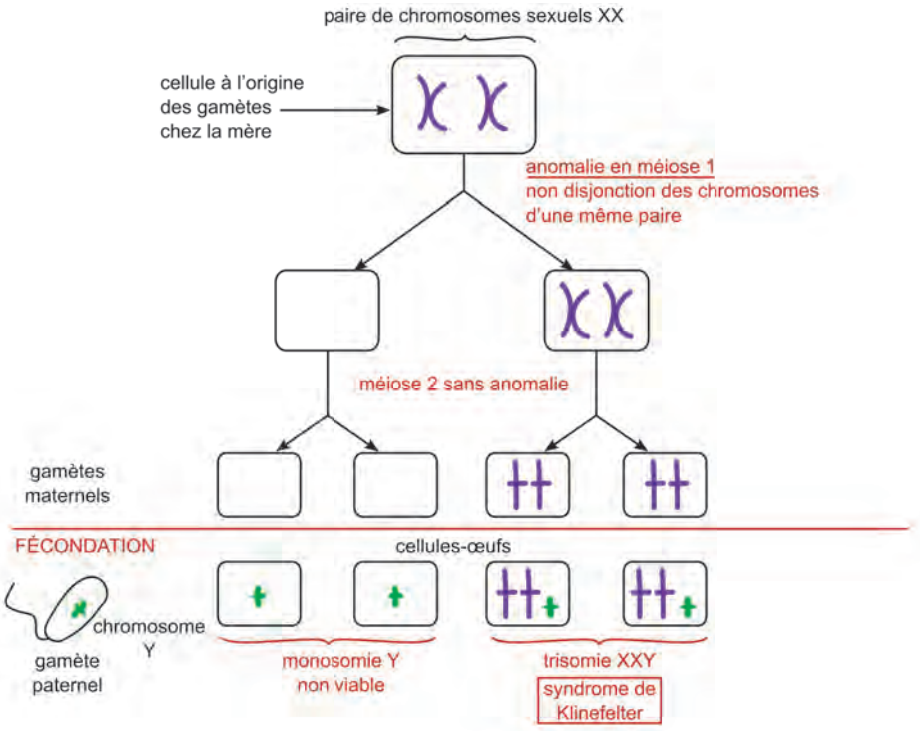
Lors de la reproduction sexuée, la méiose permet la formation des gamètes chez chacun des deux parents. En métaphase 1 de méiose 1, les chromosomes homologues, initialement appariés, se disposent de part et d'autre du plan équatorial de la cellule. Puis, en anaphase 1, chaque chromosome d'une même paire migre de façon aléatoire vers l'un des pôles de la cellule. La méiose 1 aboutit normalement à la formation de deux cellules-filles haploïdes, contenant chacune un chromosome de chaque paire de la cellule initiale. Puis, chaque cellule-fille formée subit la méiose 2, au cours de laquelle les chromatides de chaque chromosome se séparent et migrent chacune vers l'une des deux futures cellules-filles. À l'issue de la méiose sont ainsi formés quatre gamètes haploïdes contenant chacun un chromosome de chaque paire, à une chromatide. Mais des anomalies chromosomiques peuvent apparaître lors de la méiose. L'absence de séparation de deux chromosomes homologues en anaphase 1 entraîne une répartition inégale des chromosomes dans les deux cellules-filles, avec présence d'un chromosome surnuméraire dans l'une et absence d'un chromosome dans l'autre. Puis, une méiose 2 normale forme des gamètes dont la moitié ont donc un chromosome en plus et l'autre moitié, un chromosome en moins. Des anomalies peuvent aussi apparaître lors de la méiose 2

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

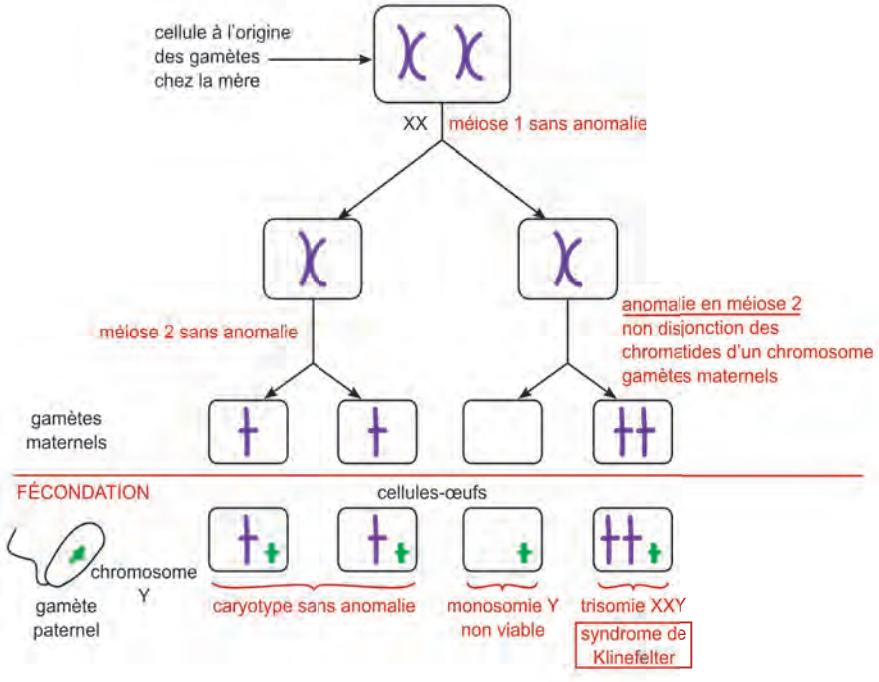
après une méiose 1 normale. Lors de l'anaphase 2, l'absence de séparation des deux chromatides d'un chromosome entraîne la migration des deux chromatides dans le même gamète. Cette méiose 2 anormale forme 2 gamètes normaux et 2 gamètes anormaux, dont l'un avec un chromosome en plus et l'autre avec un chromosome en moins.

Dans le cas de Simon, on suppose que ces anomalies ont eu lieu soit en méiose 1, soit en méiose 2, chez un seul parent (la mère, par exemple), mais pas chez l'autre (le père). La méiose anormale chez la mère a formé certains gamètes avec 24 chromosomes dont 2 chromosomes X, tandis que les gamètes du père comportent 23 chromosomes dont 1 chromosome Y. La fécondation d'un gamète maternel avec un chromosome surnuméraire par un gamète normal aboutit à une cellule-œuf avec un chromosome surnuméraire. La cellule-œuf à l'origine de Simon présente donc 47 chromosomes, dont 3 chromosomes sexuels XXY. Une telle cellule-œuf présente une trisomie (c'est-à-dire la présence de trois chromosomes au lieu de deux). Le caryotype de Simon peut également résulter d'une fécondation entre un gamète maternel normal avec un chromosome X et un gamète paternel avec deux chromosomes sexuels XY suite à une anomalie de la méiose.

La méiose et la fécondation peuvent être à l'origine d'anomalies du nombre de chromosomes dans la cellule-œuf, dues à des accidents lors de l'une des deux divisions de méiose. La conséquence est la présence d'un chromosome surnuméraire pour certains des gamètes, et d'un chromosome en moins pour d'autres. Après fécondation avec un gamète normal se forment des cellules-œufs présentant une trisomie ou une monosomie. Ces anomalies du nombre de chromosomes sont généralement à l'origine de handicaps plus ou moins importants, qui doivent être pris en charge de manière adaptée. Seul un faible nombre d'autres anomalies du nombre de chromosomes existent dans l'espèce humaine, car la majorité d'entre elles sont létales. D'autres anomalies peuvent survenir lors de la méiose, comme des délétions, des translocations chromosomiques, des inversions, etc. Dans certains cas, les accidents lors de la méiose peuvent être source d'une diversification importante des génomes, jouant un rôle essentiel dans l'évolution des espèces.



Anomalies en méiose 1 à l'origine des trisomies et monosomies (seule la paire de chromosomes sexuels affectée est représentée).



Anomalies en méiose 2 à l'origine des trisomies et monosomies (seule la paire de chromosomes sexuels affectée est représentée).

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Les chats calico, exercice 2

Le sujet (d'après bac S, 2016, Pondichéry)

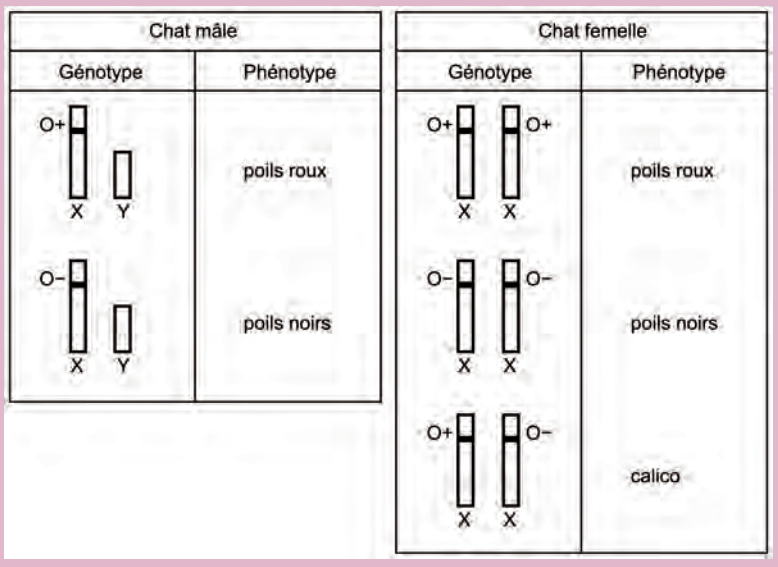
Certains chats possèdent un pelage composé d'une mosaïque de taches blanches, rousses et noires. On les appelle des « calico ». Chacune de ces mosaïques forme un motif unique qui permet de reconnaître un individu calico aussi sûrement qu'avec des empreintes digitales. On a découvert que tous les chats calico sont des femelles.

- Montrez que la méiose et la fécondation permettent d'expliquer les résultats du croisement présenté dans le document 2 ;
- expliquez comment des chattes calico possédant un même génotype peuvent avoir des pelages différents.

Vous organiserez la réponse selon la démarche de votre choix à condition qu'elle intègre des données des documents et les connaissances utiles.

Le candidat ne cherchera pas à expliquer la présence de poils blancs : ce travail ne porte que sur le déterminisme des taches rousses et noires.

Document 1 — Relation entre les allèles O+ et O− portés par les chromosomes sexuels et la couleur du pelage chez le chat.



La paire de chromosomes sexuels subit la même méiose que les autres chromosomes.

Document 2 — Résultat d'un croisement.
On croise un chat roux avec une chatte calico. Le tableau suivant présente le résultat de ce croisement :

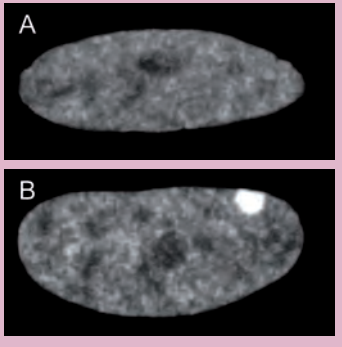
PROPORTIONS	PHÉNOTYPE	SEXE
25 % des descendants	calico	femelles
25 % des descendants	poils roux	femelles
25 % des descendants	poils roux	mâles
25 % des descendants	poils noirs	mâles

Aspects du pelage de trois des chatons femelles calico :

Document 3 — La coloration d'un poil.
Les mélanocytes sont des cellules qui fabriquent les pigments responsables de la coloration d'un poil. Les mélanocytes de chat produisent tous un pigment roux appelé trichochrome. Mais les mélanocytes peuvent aussi former un autre pigment, l'eumélanine, qui masque le trichochrome et rend le poil noir.
On a découvert que l'expression de l'allèle O+ empêche la biosynthèse d'eumélanine.

Document 4 — Le corpuscule de Barr.
Document 4.a — L'hypothèse de Mary Lyon.
En 1949, le docteur Murray Barr découvre que le noyau de certaines cellules contient un amas d'ADN qu'il baptise « corpuscule de Barr ». Douze ans plus tard, la généticienne Mary Lyon propose que le corpuscule de Barr corresponde à un chromosome X inactivé. Les gènes de ce chromosome ne pourraient plus s'exprimer, et seuls les gènes portés par l'autre chromosome X seraient utilisés par la cellule.
Selon cette hypothèse, dans une cellule embryonnaire possédant deux chromosomes X, c'est le hasard qui déterminerait lequel des deux se transforme en corpuscule de Barr. Toutes les cellules-filles de la cellule embryonnaire conserveraient ensuite le même chromosome X inactivé.

Document 4.b — Aspect du noyau d'un mélanocyte de chat mâle (A) et du noyau d'un mélanocyte de chatte calico (B).
Sur ce type d'images, un corpuscule de Barr apparaît sous la forme d'une tache blanche.



On retrouve les mêmes résultats dans tous les mélanocytes responsables des poils roux ou noirs des femelles.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

CE QU'IL NE FAUT PAS FAIRE

Ne pas identifier qu'il s'agit d'une hérédité liée au sexe.

Le corrigé

Les chats présentent des pelages de couleurs variables, qui constituent un phénotype dont le déterminisme peut être étudié. Certaines chattes dites calico présentent un pelage particulier : il est composé d'un mélange de taches de différentes couleurs (blanches, rousses ou noires). Chaque femelle calico présente un pelage unique. Comment expliquer que seules les chattes aient un pelage calico ? Quelle est l'origine de ce pelage unique ? Nous analyserons d'abord les résultats d'un croisement effectué entre un chat roux et une chatte calico, pour expliquer que seules les femelles ont un pelage calico. Puis, à partir de l'étude des cellules fabriquant les pigments responsables de la coloration des poils, nous expliquerons comment des chattes calico possédant un même génotype peuvent avoir des pelages différents.

I. Étude du croisement entre un chat roux et une chatte calico

Le document 2 présente le croisement entre un chat roux et une chatte calico. La descendance résultant de ce croisement est composée de 4 types d'individus : femelles calico (25 %), femelles à poils roux (25 %), mâles à poils roux (25 %), mâles à poils noirs (25 %). Or, la couleur des poils des chats est déterminée par un gène porté par le chromosome sexuel X (document 1). Ce gène présente 2 allèles, notés O+ et O–. Comme le chromosome sexuel Y ne porte pas ce gène, les mâles (XY) n'ont qu'un seul allèle de ce gène, alors que les femelles (XX) en ont deux. Lors de la méiose, la moitié des gamètes formés porte l'un des chromosomes sexuels, et l'autre moitié des gamètes porte l'autre chromosome sexuel. En précisant les allèles O+ et O– portés par le chromosome X, l'échiquier de croisement ci-contre présente le résultat de la fécondation des gamètes d'un mâle à poils roux et d'une chatte calico. Lors de la fécondation, la rencontre des gamètes se fait au hasard.

Mâle poils roux / Femelle calico	X_{O+} 50 %	Y 50 %
X_{O+} 50 %	(X_{O+}//X_{O+}) 25 % [femelle à poils roux]	(X_{O+}//Y) 25 % [mâle à poils roux]
X_{O-} 50 %	(X_{O+}//X_{O-}) 25 % [femelle calico]	(X_{O-}//Y) 25 % [mâle à poils noirs]

Échiquier de croisement entre un mâle à poils roux et une femelle calico.

Le document 2, en présentant les relations entre les allèles O+ et O– et la couleur du pelage chez le chat, permet de déterminer le phénotype de chaque descendant du croisement, à partir du génotype.

Ainsi, le résultat présenté dans l'échiquier de croisement correspond au résultat obtenu, montrant bien que la méiose et la fécondation permettent d'expliquer les phénotypes et les proportions des individus résultant de ce croisement.

II. Origine de la diversité du pelage des chattes calico

Les femelles calico issues du croisement étudié présentent des pelages différents avec une répartition variable des poils de différentes couleurs, alors qu'elles possèdent le même génotype (X_{O+}//X_{O-}). En 1949, Mary Lyon émet l'hypothèse suivante : dans une cellule avec 2 chromosomes X, l'un des chromosomes X est inactivé, formant alors le corpuscule de Barr. Les gènes du chromosome X inactivé ne s'expriment pas, et seuls les gènes portés par l'autre chromosome X s'expriment (document 4.a). Le document 4.b présente l'aspect du noyau des mélanocytes, cellules productrices des pigments responsables de la coloration du poil des chats.

Dans le noyau de mélanocyte de chat mâle, aucune tache blanche n'est visible, ce qui traduit l'absence de corpuscule de Barr : en effet, cette cellule ne contient qu'un seul chromosome X qui est donc actif. Mais dans le noyau de mélanocyte de chatte calico, la présence d'une tache blanche traduit l'existence d'un corpuscule de Barr qui correspond à un chromosome X inactivé dont les gènes ne s'expriment pas. L'autre chromosome X est, lui, activé et ses gènes s'expriment. Or, chez un embryon femelle de génotype (X_{O+}//X_{O-}), le choix du chromosome X inactivé s'effectue au hasard pour chaque cellule embryonnaire. Les cellules issues d'une cellule embryonnaire donnée conservent ensuite le même chromosome X inactivé que cette cellule : c'est donc soit l'allèle O+ soit l'allèle O–, porté par le chromosome X non inactivé, qui s'exprime. De plus, la coloration des poils dépend de 2 pigments : un pigment roux, le trichochrome produit par tous les mélanocytes, et l'eumélanine, qui n'est produit que par certains mélanocytes (document 3). L'expression de l'allèle O+ empêche la synthèse d'eumélanine, tandis que la présence de l'eumélanine cache le trichochrome et rend le poil noir. Ainsi, dans un mélanocyte où seul le chromosome X_{O+} est activé, l'absence de synthèse d'eumélanine entraîne la seule présence du pigment roux trichochrome, d'où des poils roux. Dans un mélanocyte où un chromosome X_{O-} est activé, l'eumélanine et le trichochrome sont synthétisés, mais l'eumélanine cache le trichochrome, d'où la couleur noire du poil.

Ainsi, la méiose et la fécondation permettent d'expliquer les résultats obtenus lors du croisement entre un chat roux et une chatte calico. Seules les chattes hétérozygotes (X_{O+}//X_{O-}) possèdent un pelage calico. Les mâles ne possédant qu'un chromosome X ne peuvent pas avoir un pelage calico. Chez les femelles calico, l'inactivation au hasard de l'un des deux chromosomes X en fonction des lignées de mélanocytes détermine le chromosome X actif et donc l'expression soit de l'allèle O+ (responsable d'un poil roux), soit de l'allèle O– (responsable d'un poil noir). Cette inactivation aléatoire varie selon les lignées de mélanocytes et explique la diversité des pelages des chattes calico. Quels sont alors, chez les femelles, les autres gènes portés par le chromosome X dont l'activation s'effectue au hasard lors de la formation du corpuscule de Barr et quelles en sont les conséquences phénotypiques ?

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Nous sommes tous des êtres mosaïques

Génomique – Des clones de cellules mutantes ont été trouvés chez 97 % des personnes analysées

C'est un résultat en forme d'oxymore, qui invite à revoir la notion de normalité. Où l'on découvre, chiffres à l'appui, que l'anomalie est plutôt la norme, dans le génome de nos cellules. À mesure que nous avançons en âge, les erreurs de copie, ou mutations, s'accumulent dans notre ADN. Globalement, des « clones » de cellules mutantes, c'est-à-dire des groupes de cellules identiques pour une mutation donnée, ont été trouvés dans près de 40 % des tissus analysés. Et chez 95 % des participants. C'est ce que révèle une étude publiée le 7 juin, dans la revue *Science*, par des équipes du Broad Institute (Massachusetts Institute of Technology) et du Massachusetts General Hospital à Boston (États-Unis). *« Les clones mutés sont la nouvelle norme » :* tel est le titre du commentaire associé, signé de Cristian Tomasetti, biostatisticien à l'université de médecine JohnsHopkins (Baltimore), qui n'a pas participé à l'étude.

Une technique originale

Nous sommes tous, sans le savoir, des mosaïques de cellules porteuses de mutations diverses. Et cette mosaïque s'étend au fil du temps. La nouvelle étude dans *Science* révèle l'ampleur du phénomène. Les auteurs ont développé une technique originale pour explorer la diversité des mutations de notre génome. Ils ont extrait des tissus tous les ARN messagers, qu'ils ont séquencé par des méthodes à haut débit – l'ARN messager est une forme de copie de l'ADN, qui sert d'intermédiaire pour la fabrication des protéines, à partir des instructions du génome. Puis, à l'aide d'une analyse statistique assez sophistiquée, ils ont repéré les fractions de ces ARN qui diffèrent de la version « normale », c'est-à-dire majoritaire dans le tissu. *« L'intérêt de séquencer les ARN, au lieu de l'ADN, est double. D'une part, on se focalise sur les seuls gènes d'intérêt : ceux qui sont actifs dans le tissu considéré. D'autre part, il y a un effet de loupe : chaque gène activé est en moyenne "recopié" en cinq molécules d'ARN, selon les auteurs »*, explique Dominique Stoppa-Lyonnet, professeure à l'université Paris-Descartes et responsable du service de génétique de l'Institut Curie. Revers de la médaille, des pans entiers du génome échappent à cette technique : les régions en dehors des gènes et les gènes peu ou pas actifs. Autre limite : seuls les clones mutants d'assez grande taille sont détectés.

Les chercheurs ont appliqué cette technique à l'analyse de 6 700 échantillons, correspondant à 29 tissus somatiques (autres que les tissus reproducteurs). Ces tissus avaient été prélevés chez 488 individus, âgés en moyenne de 45 ans, dans le cadre du programme GTEx (GenotypeTissue Expression). Résultats : 37 % des échantillons contenaient au moins un clone mutant. Et 5 % contenaient 5 clones mutants ou davantage. Au total, 95 % des participants portaient au moins un clone mutant dans leurs tissus. Pour un tiers d'entre eux, la mutation concernait un gène associé à un processus tumoral. La nature des mutations trouvées, par ailleurs, *« suggère que certains clones mutants ont acquis un avantage prolifératif »*, souligne Cristian Tomasetti. *« Cet article confirme, avec des techniques de biologie moléculaire très sensibles, que le devenir "naturel" de nos tissus est la cancérisation*, commente Jean-Charles Soria, professeur d'oncologie médicale à l'université Paris-Sud, vice-président de Medimmune, aux États-Unis. *C'est particulièrement vrai pour nos tissus à l'interface avec le monde extérieur, comme la peau et le poumon. Avec le vieillissement et l'exposition aux carcinogènes, nous avons tous des lésions précancéreuses porteuses de très nombreuses mutations. »*

Développement des cancers

Pas très rassurant ? *« La très grande majorité de ces clones mutants ne donnera pas des tumeurs »*, tempère Dominique Stoppa-Lyonnet. Certes, à mesure que nous vieillissons, nous accumulons des mutations dans les cellules de nos tissus normaux. Mais *« généralement, ces mutations s'amassent passivement, et leurs effets sont négligeables sur le comportement des cellules »*, écrit la revue *Science*. Au fond, ce travail conforte la vision d'un *« processus darwinien »* pour le développement des cancers. *« Seules les cellules qui auront accumulé une somme de mutations conférant un avantage sélectif conduiront à un clone très prolifératif, invasif et dangereux »*, ajoute Dominique Stoppa-Lyonnet.

En n'analysant que le clone tumoral final, les chercheurs pâtissaient jusqu'ici d'un *« biais d'observation »*. Ils ne voyaient que les mutations finales accumulées, et non celles qui avaient été éliminées. En séparant les

POURQUOI CET ARTICLE ?

Cet article fait un point très intéressant et actualisé sur l'accumulation des mutations au cours de la vie d'un être humain. Alors que toutes les cellules de l'organisme proviennent de la même cellule-oeuf initiale, par divisions cellulaires successives, l'accumulation des mutations au cours du temps fait de nous des êtres mosaïques, c'est-à-dire que toutes nos cellules n'ont pas la même information génétique. Des scientifiques américains ont récemment étudié l'ensemble des ARN messagers produits dans les cellules d'une trentaine de tissus différents d'environ 500 personnes. La recherche de mutations étendues sur ces ARNm montre que près de la moitié des tissus analysés comportent au moins un clone mutant, et que la quasi-totalité des individus étudiés présentent au moins un clone mutant parmi les tissus étudiés. L'étude met en évidence les facteurs augmentant la présence des mutations, et analyse les conséquences de celles-ci. Si la majorité des mutations est sans conséquence sur le devenir des cellules, certaines peuvent leur conférer un avantage prolifératif, à l'origine d'un processus de cancérisation.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

participants en deux groupes, les plus et les moins de 45 ans, les auteurs ont trouvé que le taux de mutations somatiques augmente avec l'âge. Par ailleurs, les mutations sont bien plus fréquentes dans les tissus qui se renouvellent beaucoup que dans les muscles ou le cerveau, tissus qui prolifèrent peu. Les plus forts taux de mutations concernent la peau et les poumons, *« deux tissus très affectés par l'exposition solaire ou le tabac »*, observe Cristian Tomasetti. Reste à explorer plus avant la dynamique temporelle de ces processus si l'on veut comprendre le phénomène de transformation en cancer. ●

Florence Rosier, *Le Monde* daté du 12.06.2019

Les plantes aussi échangent des gènes

La découverte chez une graminée australienne de fragments d'ADN provenant d'autres plantes interroge sur la dissémination de fonctions facilitant l'adaptation des végétaux.

Les êtres vivants héritent de leur patrimoine génétique de différentes manières. On parle de transfert vertical de gènes quand ceux-ci proviennent des parents : c'est le cas chez les eucaryotes pluricellulaires, dont nous faisons partie. Mais des transferts horizontaux, ou latéraux, peuvent aussi avoir lieu entre espèces différentes – c'est fréquemment le cas chez les bactéries ou des moisissures.

Chez les plantes, il se confirme que ce transfert horizontal est lui aussi à l'œuvre, comme l'illustre une étude publiée le 18 février dans PNAS et portant sur une graminée, *Alloteropsis semialata*, qui a une vaste répartition en Afrique, Asie et Australie. Un mécanisme opportuniste, qui lui offre un raccourci pour bénéficier de millions d'années de raffinements évolutifs.

Depuis plus d'une décennie, divers exemples ont déjà été décrits chez d'autres plantes, mais ils portaient essentiellement sur des transferts liés aux gènes de la mitochondrie, cette usine énergétique de la cellule, ou à des interactions avec des parasites. Le génome des plantes est également bourré d'éléments transposables, qui circulent entre elles. Mais ils sont généralement silencieux, c'est-à-dire qu'ils n'ont pas de fonction connue.

Ce n'est pas le cas chez *Alloteropsis semialata*. *« La comparaison de son génome nucléaire avec celui de 146 autres graminées a montré que sur un total de 22 043 gènes, 59 gènes avaient été acquis latéralement, provenant au minimum de 9 espèces donneuses »*, indique Pascal-Antoine Christin (université de Sheffield), dernier auteur de l'étude. Et pour plus de la moitié d'entre eux, ces gènes sont actifs. En 2012, la même équipe avait déjà montré que des transferts latéraux expliquaient l'acquisition par certaines espèces d'*Alloteropsis* d'un mécanisme de photosynthèse plus efficace, dit en C_4, que la voie dite en C_3 originelle. Cette amélioration avait en outre eu lieu au moins quatre fois de façon indépendante, à partir de plantes qui avaient divergé de cette graminée depuis au moins 20 millions d'années.

Pascal-Antoine Christin et ses collègues sont donc repartis d'un plant australien pour élargir la recherche de transferts latéraux à d'autres gènes. Tout se passe comme si la diffusion de cette espèce, apparue il y a environ deux millions d'années en Afrique, s'était accompagnée d'emprunts auprès d'espèces déjà adaptées aux milieux plus récemment colonisés. *« Dans tous les cas, le donneur et le receveur avaient évolué indépendamment pendant des dizaines de millions d'années avant les transferts »*, notent les chercheurs. Ces transferts fonctionnels ont ajouté des innovations au bagage génétique d'*Alloteropsis*, notamment plusieurs moyens de résistance à des maladies, au stress lié à un changement d'environnement, en plus des gènes améliorant la photosynthèse déjà décrits.

L'abondance des transferts de gènes fonctionnels montre que ce processus a probablement des conséquences pour l'adaptation des plantes. *A. semialata* n'est pas un cas unique : l'équipe a aussi découvert des transferts horizontaux de gènes chez d'autres genres de plantes. Cela ne pourrait être que *« la pointe émergée de l'iceberg »*, avancent les chercheurs.

Echange de pollens ?

Reste à découvrir le mécanisme précis de ces transferts, qui demeure mystérieux. *« Nous n'avons pas de preuve de la façon dont cela se déroule, seulement des hypothèses*, indique Guillaume Besnard, du laboratoire évolution et diversité biologique de Toulouse (CNRS-IRD), qui co-signe l'étude. *Cela pourrait passer par l'échange de pollens sur les stigmates* [le capteur de pollen chez les plantes à fleurs]*, ou des contacts au niveau des rhizomes. »* Parmi les vecteurs possibles, *« Il faudrait ajouter les champignons pathogènes et virus communs à ces graminées ainsi que les bactéries du sol qui pourraient entraîner des morceaux de séquence ADN »*, suggère Henri Darmency (INRA Dijon).

« J'ai beaucoup aimé ce travail, qui permet de passer d'anecdotes sur quelques gènes à une vision plus large du phénomène, commente Hervé Philippe, de la station d'écologie théorique et expérimentale (CNRS) de Moulis. *J'ai seulement des réserves sur sa généralité. Il est possible que ce ne soit pas représentatif de ce qui se passe chez l'ensemble des plantes à fleur. En tout cas, il y a des ordres de grandeur différents entre sa fréquence chez les bactéries et les plantes. »* L'équipe de Sheffield a déjà commencé à explorer les génomes de plantes cultivées, et de milliers d'autres graminées, pour voir si elles sont aussi concernées.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

La question des multirésistances

Même si ces événements sont apparemment *« très rares »* (59 gènes sur 22 000), note Guillaume Besnard, *« il y a un réel enjeu à étudier la possibilité qu'il intervienne à partir de plantes génétiquement modifiées, qui pourraient céder leurs traits* [caractéristiques] *à d'autres végétaux. Il faut donc comprendre comment cela se passe. » « La question est d'autant plus légitime que ces transferts de gènes horizontaux sont l'une des causes des multirésistances observées chez les bactéries »*, souligne Hervé Philippe.

Quid par exemple de la résistance au glyphosate ou au glufosinate observée, notamment aux États-Unis, chez des mauvaises herbes dans les champs d'OGM conçus pour tolérer ces herbicides ? Pour le glyphosate, répond Henri Darmency, les mutations identifiées *« excluent un transfert de gènes horizontal »*. Idem pour le ray-grass anglais face au glufosinate. Mais *« s'agissant d'une molécule proche d'un antibiotique »*, c'est plutôt du côté d'un tel transfert depuis des bactéries du sol qu'il faudrait enquêter dans le cas de la résistance de l'éleusine des Indes, dont le mécanisme n'est pas encore identifié, estime-t-il.

Hervé Morin, *Le Monde*
daté du 22.02.2019

POURQUOI CET ARTICLE ?

Le génotype des individus résulte généralement d'un transfert vertical de gènes qui a lieu lors la reproduction sexuée, mais il peut aussi résulter d'un transfert horizontal de gènes, c'est-à-dire entre espèces différentes. **Cet article présente les résultats d'une étude du génome d'une graminée, en Australie.** Sur les 22 000 gènes environ que compte l'espèce *Alloteropsis semialata*, environ 60 résultent de transferts de gènes horizontaux provenant d'autres espèces. Certains gènes ainsi transférés ont permis l'acquisition de caractères importants pour la plante, comme ceux optimisant la photosynthèse ou conférant des résistances à des pathogènes. Cette étude met en évidence l'ampleur des transferts horizontaux dans l'évolution des génomes végétaux, et interroge sur les mécanismes ayant permis ces transferts.

L'homme n'a pas le monopole de la culture

La culture n'est pas le propre de l'homme. Singes, baleines, oiseaux… Les scientifiques accumulent les exemples de comportements locaux, acquis socialement, indépendamment des contraintes génétiques ou environnementales. Dernières admises au club : les mouches

Ils sont philosophe, poète, romancier, anthropologue ou même comédien. Ils s'appellent Emmanuel Kant, Aimé Césaire, André Malraux, Claude Lévi-Strauss, Groucho Marx. Des hommes de « culture », assurément, au point d'avoir chacun proposé de cette fameuse notion au moins une définition. Rien de commun entre elles. Ou plutôt si : toutes sont centrées sur l'humain. Comme le sont, sans exception, les citations puisées dans les meilleurs ouvrages. Peinture, musique, symboles, langage, ou encore goûts, valeurs et principes moraux y tiennent les premiers rôles. *« C'est normal. On a défini la culture pour que ça colle avec l'humain, et seulement avec l'humain, car nous sommes convaincus de détenir une place unique dans le monde, supérieure à tous les autres, et n'avons cessé, depuis Descartes, de chercher tout ce qui nous distingue des autres animaux. C'est évidemment absurde et scientifiquement sans intérêt. On peut chercher ce qui caractérise une voiture. Mais comme scientifique, ce qui doit nous intéresser, c'est la roue. Et la roue de la culture, elle dépasse de très loin notre espèce. »*

L'homme qui livre cette déclaration de principe est effectivement scientifique, plus précisément biologiste, directeur de recherche au CNRS (université Paul-Sabatier, Toulouse). Après une vie passée à observer les animaux, à réaliser des expériences, à réfléchir sur l'évolution et à proposer des théories volontiers iconoclastes, Etienne Danchin s'apprête à prendre sa retraite.

Juste avant cela, il vient de lancer une dernière grenade dans la revue *Science*. Un article particulièrement détonant. Il y a apporté la preuve que les mouches drosophiles disposent des capacités cognitives pour se transmettre culturellement des comportements. Vous avez bien lu : les mouches drosophiles, stars des laboratoires de biologie, plus réputées toutefois pour leur simplicité génétique que pour leur puissance cérébrale. Au terme de deux années d'expériences, il a en effet montré que les minuscules insectes qui pullulent sur nos fruits ou dans nos vieilles bouteilles de vinaigre pouvaient acquérir une préférence sexuelle par apprentissage social, autrement dit par observation d'un congénère, et que cette préférence pouvait se transmettre de génération en génération. *« Cela a dû en étonner plus d'un*, sourit le primatologue Andrew Whiten, de l'université de St Andrews, en Ecosse. *Un si modeste insecte. Mais il fallait s'y attendre. Le "culture club", autrefois réservé aux humains, ne cesse de grandir. »*

L'histoire de cette lente conquête n'a pas commencé en Europe. Sur le continent des Lumières et de l'humanisme, l'étude

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

des animaux avait gagné son autonomie en érigeant un interdit majeur : l'anthropomorphisme. Pas plus que l'émotion ou l'intelligence, la culture ne pouvait donc trouver place dans le vocabulaire et la pensée des éthologues occidentaux. Rien de tel en Orient, où la relation entre l'homme et l'animal s'appuie sur d'autres principes. Question de religion, sans doute ; probablement aussi de siècles de cohabitation avec nos plus proches cousins, les singes.

Et c'est au Japon, dans l'îlot de Koshima, en septembre 1953, qu'intervient un événement fondateur. Depuis quelques années, des scientifiques y étudient un groupe de macaques qu'ils approchent en leur offrant des patates douces. Ce jour-là, une jeune femelle de 18 mois se saisit d'un morceau de tubercule. Mais au lieu de l'engloutir, elle gagne la rivière voisine où elle le trempe avant de croquer dedans. Imo perfectionnera sa technique avec les années. D'abord, en nettoyant la terre consciencieusement, puis en profitant de la force du courant, enfin, en réalisant l'opération dans la mer voisine. Surtout, elle fait des émules. Trois mois plus tard, sa mère et deux autres jeunettes reproduisent ce comportement. Puis d'autres jeunes et d'autres mères. En cinq ans, les trois quarts des juvéniles et des jeunes adultes étaient convertis. Les mâles de plus de 4 ans, en revanche, rejetèrent la nouveauté.

En 1965, le primatologue Masao Kawai détaille cette observation dans la revue Primates. Il y décrit le génie d'Imo. La jeune guenon s'est en effet trouvée confrontée à un autre problème : séparer les grains de blé, également offerts aux singes, du sable de la plage avec lequel ils se mélangent. Là encore, elle a gagné la mer pour s'apercevoir que les uns flottent quand les autres tombent au fond… Au-delà de l'exploit individuel, c'est au groupe que s'est intéressé Kawai. Son article parle de *« comportements préculturels nouvellement acquis »*, le préfixe ne trompe personne. Une longue bataille commence.

Philosophes, anthropologues, psychologues mais aussi toute l'école occidentale d'éthologie, héritière de Konrad Lorenz et Nico Tinbergen, rejettent ces conclusions. L'école japonaise trouve en revanche le soutien d'une nouvelle génération de primatologues qui occupe peu à peu le terrain, au sens propre. Elles se nomment Jane Goodall, Dian Fossey ou Shirley Strum, s'immergent au milieu des grands singes et voient comme une évidence la transmission sociale de certains comportements. Car c'est bien de cela qu'il s'agit. La nouvelle définition de la culture que propose cette avant-garde est celle de comportements stables acquis non pas génétiquement ou par des contraintes environnementales mais par l'apprentissage social.

Pour les mettre en évidence, l'objectif consiste désormais à traquer au sein d'une même espèce des sous-groupes affichant des traditions distinctes. Chaque primatologue y va de ses observations. Et en 1999, Andrew Whiten publie dans *Nature* une synthèse sobrement titrée « Les cultures chez les chimpanzés ». En deux pages, un tableau et une figure qu'il a soigneusement confectionnée, le scientifique, peintre à ses heures perdues, résume 151 années d'observation totale conduites sur 7 sites africains différents. Il n'en retient pas moins de 39 comportements spécifiques à certains groupes de chimpanzés, de l'hygiène individuelle au toilettage des congénères, des rituels sociaux ou de séduction à l'alimentation et à l'usage d'outils.

Apprentissage socialement motivé

Le plus emblématique de ces comportements reste la casse des noix. L'Allemand Christoph Boesch a documenté avec précision la façon dont les chimpanzés du parc national de Taï, en Côte d'Ivoire, utilisent de lourdes pierres pour briser l'épaisse gangue du fruit du Panda oleosa. Non seulement ils maîtrisent ce qu'il faut bien appeler des outils – une compétence longtemps considérée comme exclusivement humaine –, mais ils les conservent, les transportent, coopèrent pour partager le travail. Une activité que les plus jeunes apprennent de leurs mères, pendant plusieurs années, avant de devenir autonomes, souligne le primatologue du Max Planck Institute. Ils observent, copient, échouent d'abord, s'abîment les doigts, recommencent. *« Un apprentissage socialement motivé*, conclut Frans de Waal, dans son ouvrage *Quand les singes prennent le thé* (Fayard, 2001). *Au début il y a la mère, le désir d'agir comme elle. En cours de route, presque par accident, apparaît un second objectif, se nourrir d'un mets agréable. »*

Cette activité, tous les chimpanzés ne la pratiquent pas. Au nord-ouest de la forêt du Taï, sur le site de Bossou, en Guinée, les singes s'y adonnent également, cette fois avec les noix du palmier à huile. Idem au Liberia et en Sierra Leone, toujours à l'ouest, avec les fruits du coula. Mais à l'est, le fleuve Sassandra semble faire figure de frontière culturelle. Sur l'autre rive, les mêmes arbres, les mêmes pierres, mais aucun cassage de noix observé. Pas davantage, du reste, sur les sites étudiés au Gabon, en Ouganda, au Rwanda, en Tanzanie…

Six ans plus tard, Andrew Whiten enfonce le clou, au laboratoire, cette fois. Pour s'assurer du caractère social de l'apprentissage, il conçoit une boîte offrant deux méthodes distinctes d'accès à la nourriture, qu'il enseigne chacune à une chimpanzé de haut rang. Puis les femelles sont replacées dans leur groupe d'origine. Rapidement, chaque communauté apprend le savoir-faire de sa dominante. Quelques rares individus découvrent bien la technique alternative. Mais ils rentrent vite dans la norme. Le chercheur présente enfin le dispositif à un troisième groupe, dépourvu de modèle. Les singes y resteront comme des poules devant un couteau.

Après les chimpanzés, 24 comportements culturels sont relevés chez les orangs-outangs dans les années 2000. Puis dans la décennie suivante, vient le tour des gorilles. *« Ça a été plus difficile à établir, car le gorille privilégie la force sur le maniement d'outils*, indique Shelly Masi, du Muséum national histoire naturelle, qui étudie le colosse des forêts depuis de nombreuses années. *Face à une termitière, un chimpanzé cherche une baguette pour la percer, un gorille la casse. Mais nous avons pu observer des différences de rituels sociaux ou de techniques pour grimper aux arbres, par exemple… »*

Les grands singes, donc. Mais aussi les mammifères marins. L'Américaine Jennifer Allen a ainsi analysé les techniques de pêche des baleines à bosse dans le golfe du Maine (États-Unis). Leur méthode traditionnelle est connue : créer, en soufflant, un filet de bulles avant d'avaler les poissons ainsi emprisonnés. Sauf que, en 1980, une innovatrice est vue frappant violemment de sa queue la surface avant de plonger pour produire ses bulles. Une façon d'éviter une fuite par le haut ? Toujours est-il que la pratique s'est répandue et que, vingt-sept ans plus tard, 40 % des cétacés de la région employaient cette technique. Nulle part ailleurs cette pratique n'a été observée.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Révolution culturelle chez les baleines

L'écologue de l'université du Queensland (Australie) ne s'est pas arrêtée là. Elle s'est penchée sur le chant des baleines, cette fois au nord de son île. Un sujet particulièrement symbolique, tant la langue constitue tout à la fois une particularité humaine et le véhicule principal de nos cultures. Au terme de treize années de suivi d'un groupe de cétacés, Jennifer Allen constate une complexification progressive des séquences. Une évolution régulière soudainement interrompue au contact d'un autre groupe, venu de l'ouest. Les baleines intègrent alors un peu du vocabulaire de leurs cousines mais simplifient les thèmes et structures. Ce phénomène, la biologiste marine lui a donné un nom : « révolution culturelle ».

Mais est-ce bien de culture que l'on parle ? Retraité de l'université McMaster, au Canada, le professeur Bennett Galef s'est toujours montré dubitatif face à des conclusions qu'il juge *« hâtives »*. Il n'écarte pas l'existence, chez les animaux, d'un apprentissage social, au contact des congénères. *« Par renforcement local* [essais et erreurs] *ou par émulation*, précise-t-il. *Mais pas par imitation, en tout cas, je n'en ai jamais eu la preuve. Et cela fait toute la différence »*, insiste-t-il. Longtemps, il a ainsi contesté l'autre emblème des cultures animales, pendant chez les oiseaux des macaques de Koshima : les mésanges britanniques.

Le village de Swaythling, près de Southampton, ne brillait pas par son originalité. Chaque matin, le laitier y déposait ses bouteilles sur le pas des portes. Jusqu'à ce jour de 1921 où un habitant trouva son flacon vandalisé. Le capuchon avait été percé, la crème dérobée. Le phénomène s'étendit dans le village, on finit par trouver le coupable : Cyanistes caeruleus, la mésange bleue. On changea les capuchons, les mésanges s'adaptèrent. Et le pillage se répandit peu à peu. En 1949, l'essentiel de l'Angleterre et du Pays de Galles était concerné. Au point que James Fisher et Robert Hinde, sommités de l'ornithologie, furent convoqués. Analysant les différents foyers successifs et la dynamique de progression, ils en conclurent que plusieurs innovateurs avaient parallèlement découvert la combine, rapidement imités par leurs congénères.

Culture ? Expérience à l'appui, Bennett Galef assura, en 1984, que des mésanges à tête noire américaines pouvaient reproduire le forfait de leurs cousines britanniques soit spontanément, soit après avoir observé une bouteille ouverte. Culture peut-être, concluait-il, mais imitation, sûrement pas. Pendant trente ans, la question demeura en suspens. Jusqu'à ce que la biologiste Lucy Aplin, du Max Planck Institute de Radolfzell (Allemagne), conduise, en terre anglaise et à grande échelle (plus de 400 individus), une série d'expériences avec des mésanges. À la façon de Whiten, en 2005, elle conçoit une mangeoire avec une porte coulissante susceptible d'être ouverte de droite à gauche ou de gauche à droite et apprend l'une des deux techniques à quelques démonstratrices, qu'elle replace ensuite dans différents groupes d'oiseaux. Elle constate que chaque groupe adopte la technique de ses modèles. Mais aussi que la translocation d'un oiseau d'un groupe à l'autre conduit tout transfuge à adopter les manières de ses nouveaux condisciples. *« A Rome, fais comme les Romains »*, commente Andrew Whiten, citant Ambroise de Milan (340-397). Ce qu'en psychologie on nomme la conformité.

Et ce n'est pas tout : l'apprentissage se transmet de génération en génération, même après le départ des premières initiées, ajoute Lucy Aplin dans son article, publié en 2014 dans *Nature*. De plus en plus vite et de mieux en mieux. Un constat essentiel si l'on songe que les cultures humaines sont dites cumulatives, à savoir que chaque génération améliore la connaissance de la précédente. *« Ce sera une de nos principales directions de travail à venir »*, indique Lucy Aplin, consciente que les exemples d'apprentissages sociaux cumulatifs chez les animaux demeurent exceptionnels. L'autre devrait s'attacher à suivre le réseau de transmission culturelle. Déjà, dans l'article de *Nature*, elle a montré que la chance d'un individu ignorant d'acquérir le nouveau savoir était proportionnelle aux contacts qu'il entretenait avec un sachant. *« Mais là encore il faut aller plus loin, examiner les caractéristiques individuelles, le sexe, l'âge de chaque oiseau »*, dit-elle.

Hérédité culturelle

Jusqu'où les processus sont-ils cumulatifs ? Comment s'articulent conformité et innovation ? Quel réseau suit l'apprentissage dans les grands groupes ? Et qu'est-ce que ces observations peuvent nous dire sur l'émergence de la culture chez les humains ? Des chants des moineaux aux itinéraires migratoires des mouflons, des préférences alimentaires des orques aux techniques de chasse des suricates, les animaux offrent une panoplie toujours plus étendue pour approcher ces questions.

Dans les 17 mètres carrés de son laboratoire toulousain, Etienne Danchin jubile. Pas mécontent d'avoir fait descendre encore un peu *Homo sapiens* de son piédestal. Mais surtout heureux d'alimenter la conviction qui l'anime depuis vingt ans, à savoir que *« l'évolution n'est pas seulement un processus génétique »*. Des centaines de scientifiques en sont désormais convaincus, qui ont créé, il y a deux ans, la Cultural Evolution Society. Il se murmure qu'anthropologues et écologues y ont trouvé une langue commune. Une hérédité culturelle, des humains aux mouches ? Et pourquoi pas aux plantes ? Les moustaches en guidon de vélo d'Etienne Danchin se redressent. Il sourit : *« C'est encore un peu tôt. »* ●

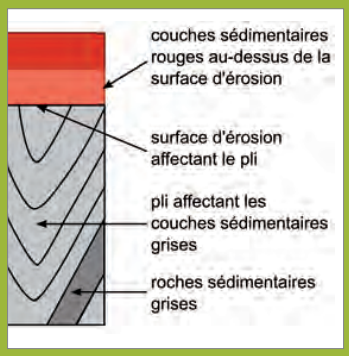
Nathaniel Herzberg, *Le Monde* daté du 20.03.2019

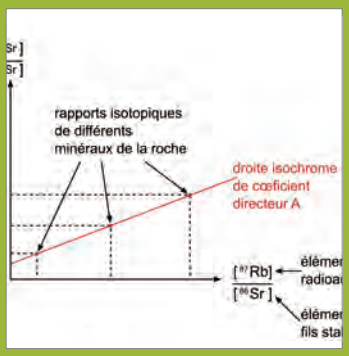
POURQUOI CET ARTICLE ?

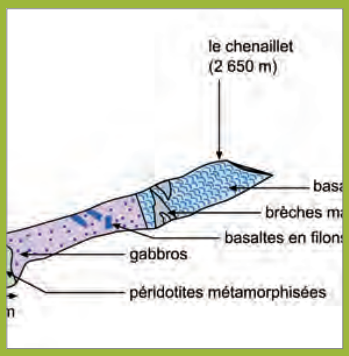
Pendant longtemps, l'espèce humaine a eu le monopole de la culture. Mais l'observation attentive des comportements de différentes espèces animales a mis en évidence que nombre d'entre elles, notamment chez les mammifères et les oiseaux, possédaient une culture. Cette culture se définit alors comme un ensemble de pratiques acquises non pas génétiquement, mais grâce à un apprentissage social par imitation entre individus d'une même génération ou de générations différentes. **Cet article fait le point sur l'évolution des connaissances en ce qui concerne la culture animale, alors qu'une transmission culturelle d'un comportement vient juste d'être décrite chez une espèce de mouches très étudiées au laboratoire, les drosophiles.** Aujourd'hui, l'espèce humaine n'est plus considérée comme la seule espèce à posséder une culture, même si celle-ci est particulièrement diversifiée et cumulative.

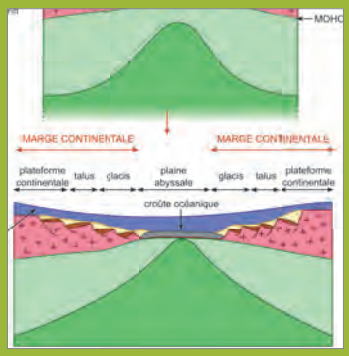
© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

À LA RECHERCHE DU PASSÉ GÉOLOGIQUE DE NOTRE PLANÈTE









© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Le temps et les roches

L'un des objectifs majeurs de la géologie est la reconstitution de l'évolution de la Terre à partir de l'étude de témoins. Mais la reconstitution des temps anciens, dont les témoins sont peu nombreux et modifiés, est difficile. Les roches présentes à la surface de la Terre ont enregistré les différents événements de son histoire, qui est étroitement liée à celle de la vie. Comment l'étude des roches permet-elle de reconstituer l'histoire de la Terre ?

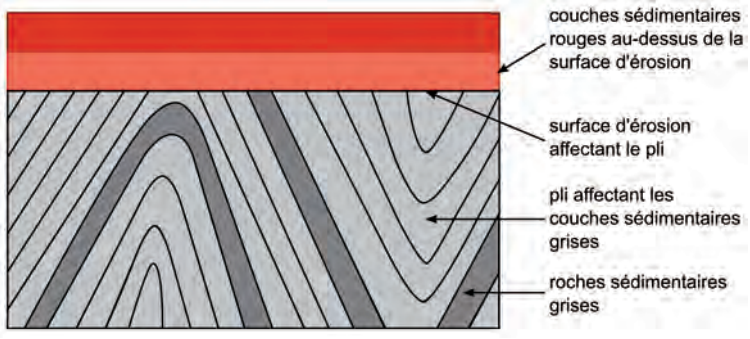
La chronologie relative

La **datation** est la détermination de l'âge d'un objet (roche, minéral, fossile, etc.), d'une structure (pli, faille, etc.) ou d'un événement géologique (plissement, érosion, etc.). La **datation** ou **chronologie relative** vise à **ordonner dans le temps** les éléments géologiques les uns par rapport aux autres. Elle repose sur **quelques grands principes**.

Le premier est le **principe de continuité** qui établit qu'une même couche est de même âge en tous ses points. Le second est le **principe de superposition** qui concerne les structures géologiques formées par dépôts successifs, comme les roches sédimentaires ou les coulées volcaniques : lorsque deux couches sont superposées, la couche inférieure est plus âgée que la couche supérieure. L'application de ce principe, aisée dans les zones peu modifiées tectoniquement, est difficile lorsque les couches sont déformées.

Le troisième principe est le **principe de recoupement**, selon lequel toute structure géologique qui en affecte ou en recoupe une autre lui est postérieure. Il peut s'appliquer à **l'échelle de l'affleurement**. Ainsi, l'observation de roches déformées (plissées, faillées, etc.) indique que les déformations sont postérieures à la formation de ces roches. Le principe de recoupement s'applique aussi à **l'échelle du minéral** : un minéral qui en recoupe un autre lui est postérieur. Le quatrième principe est le **principe d'inclusion** selon lequel tout minéral contenu dans un autre lui est antérieur. L'application de ces différents principes, qui exploitent les relations géométriques entre les objets géologiques, permet d'établir un ordre temporel de formation de ces objets et des événements les affectant.

La datation relative utilise également les informations issues de certains fossiles, qui sont des restes d'êtres vivants ou de leur activité, conservés dans une roche. Elle se base sur l'étude des associations de **fossiles stratigraphiques**, appartenant à des espèces ayant une courte durée de vie et dont la zone de répartition géographique est étendue. Selon le **principe d'identité paléontologique**, deux couches contenant les mêmes fossiles stratigraphiques sont de même âge. Les études des associations



Application des principes de la datation relative : étude d'une discordance angulaire.
L'application des principes de la datation relative permet d'ordonner dans le temps les étapes de la formation de cette discordance angulaire : 1. formation des couches sédimentaires grises ; 2. plissement des couches sédimentaires grises ; 3. érosion des couches sédimentaires grises plissées ; 4. formation des couches sédimentaires supérieures.

ZOOM SUR…

LES DIFFÉRENTS CHRONOMÈTRES

Chronomètre Élément père	Éléments fils	Temps de demi-vie $t_{1/2}$ (en années)
^{87}Rb	^{87}Sr	$48{,}8 \times 10^9$
^{40}K	^{40}Ar	$11{,}9 \times 10^9$
^{238}U	^{206}Pb	$4{,}6 \times 10^9$
^{235}U	^{207}Pb	700×10^6

NOTIONS-CLÉS

L'ACTUALISME

Selon l'actualisme, les causes des phénomènes géologiques passés sont similaires à celles des phénomènes actuels. C'est une méthode fructueuse pour reconstituer l'histoire de la Terre et cette théorie s'est opposée au XVIII^e^ et au XIX^e^ siècle au catastrophisme, qu'il fût irrationnel (interventions surnaturelles) ou rationnel (cataclysmes). Dans son acception extrême, l'actualisme constitue l'uniformitarisme, défendu par l'anglais Charles Lyell (1797-1875) : les phénomènes passés sont identiques aux phénomènes actuels, y compris dans leur intensité. Aujourd'hui, la géologie utilise l'actualisme comme principe d'étude, tout en reconnaissant la variabilité des phénomènes au cours de l'histoire de la Terre et la survenue de phénomènes catastrophiques.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

de fossiles permettent de comparer l'âge de roches géographiquement éloignées. La mise en relation de datations relatives dans différentes régions conduit à établir **l'échelle stratigraphique internationale des temps géologiques**. L'unité de base de cette échelle est **l'étage**, défini par un affleurement ayant des caractéristiques géologiques et paléontologiques spécifiques, et délimité par des **coupures** inférieures et supérieures nettes. Les étages sont regroupés en **périodes**, puis les périodes définissent les **ères**. Les limites entre les ères ou les périodes correspondent à des événements majeurs de l'histoire de la Terre et de la vie, généralement des **crises biologiques**.

La chronologie absolue

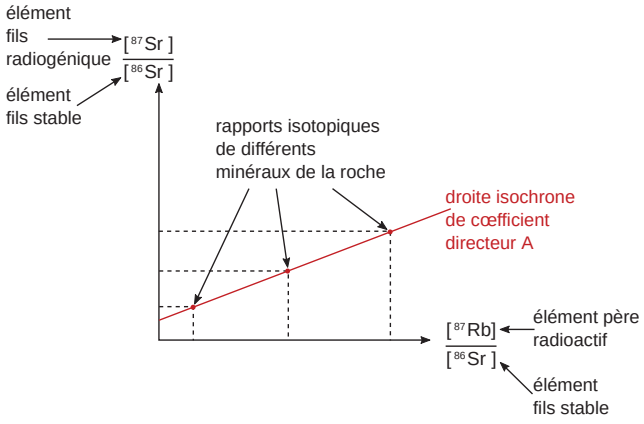
La datation relative permet d'établir l'ordre temporel des événements mais ne renseigne pas sur leur âge absolu ni de manière précise sur leur durée. L'objectif de la **datation absolue** est d'attribuer une **date** à un événement. Elle utilise essentiellement la **radiochronologie**, qui exploite la radioactivité naturelle de certains éléments chimiques. Lors d'une réaction radioactive, l'élément radioactif père se désintègre de manière continue et irréversible en élément fils, dit radiogénique. La **loi de décroissance radioactive** établit que, dans un échantillon de matière, le rapport entre les quantités actuelle et initiale de l'élément père ne dépend que du temps écoulé depuis le début de la réaction. Chaque élément radioactif père est caractérisé par sa **demi-vie**, qui correspond au temps de désintégration de la moitié de la quantité initiale présente dans l'échantillon. Dans une roche, la quantification de l'élément père radioactif ou de l'élément fils permet de déterminer l'âge de la roche, à condition de connaître la quantité initiale de l'élément père.

Comme la quantité initiale de l'élément père est rarement connue, il est souvent nécessaire d'introduire une autre grandeur, comme la quantité d'un isotope stable de l'élément fils. L'estimation par spectrométrie de masse des rapports isotopiques élément père/élément fils stable et élément fils radiogénique/élément fils stable de différents minéraux d'une roche permet de tracer une droite isochrone dont le coefficient directeur permet d'obtenir l'âge de la roche. Différents **chronomètres** sont utilisés en géologie : **^{87}Rb/^{86}Sr, ^{40}K/^{40}Ar, ^{238}U/^{206}Pb et ^{235}U/^{207}Pb**. Un chronomètre de demi-vie $t_{1/2}$ peut être utilisé pour dater un âge compris dans l'intervalle $[0{,}01t_{1/2} ; 10t_{1/2}]$. La datation d'une roche nécessite de choisir un chronomètre approprié, en tenant compte de l'âge supposé de la roche et de la présence du chronomètre.

L'âge estimé est le temps écoulé depuis le début de la réaction de désintégration radioactive, c'est-à-dire depuis l'âge de la **fermeture du système** considéré, le minéral ou la roche. Cette fermeture consiste en l'arrêt des échanges avec l'environnement. Lorsqu'un minéral se forme par cristallisation à partir d'un magma, la fermeture du système correspond à la cristallisation de ce minéral, qui piège les éléments pères et fils. La radiochronologie s'utilise sur les **roches magmatiques et métamorphiques**, considérées comme des systèmes fermés à partir de leur cristallisation. Ainsi, la datation absolue (en datant les limites entre les différents étages, périodes et ères de l'échelle stratigraphique) aboutit à une **échelle numérique des temps géologiques,** dont les âges sont susceptibles d'être modifiés en fonction de l'évolution des connaissances.

La datation rubidium/strontium

La mesure des rapports des concentrations isotopiques $[^{87}Sr]/[^{86}Sr]$ et $[^{87}Rb]/[^{86}Sr]$ sur plusieurs minéraux de la roche permet de tracer la droite isochrone, dont on détermine le coefficient directeur A.



$$t = t_{1/2} \frac{\ln(A+1)}{\ln 2}$$

Estimation de l'âge d'une roche magmatique à l'aide du chronomètre ^{87}Rb ($t_{1/2}$ = 48,8 Ga).

ZOOM SUR…

LES CRISES BIOLOGIQUES DANS L'HISTOIRE DE LA VIE ET LA TERRE

Une crise biologique est une période marquée à l'échelle du globe par la disparition de groupes entiers d'espèces. Cinq grandes crises biologiques correspondant à des extinctions de masse sont identifiées dans l'histoire.

Vers –445 Ma (millions d'années), à la fin de l'Ordovicien, pendant l'ère primaire, une crise majeure a touché des espèces marines et aurait entraîné la disparition de 85 % d'entre elles. La crise biologique datée de –374 Ma marque la séparation entre deux étages du Dévonien, pendant l'ère primaire. Celle datée de –250 Ma constitue la limite entre le Permien, fin de l'ère primaire, et le Trias, début de l'ère secondaire. Elle est considérée comme la plus importante de l'histoire de la Terre : environ 95 % des espèces vivantes (dont les trilobites) auraient disparu. La crise datée de –200 Ma marque la limite entre le Trias et le Jurassique, pendant l'ère secondaire, et a affecté les milieux océaniques et continentaux. La crise biologique ayant eu lieu vers –66 Ma marque la limite entre le Crétacé, fin de l'ère secondaire, et le début de l'ère tertiaire. Elle est caractérisée par la disparition non seulement des dinosaures, mais aussi de nombreuses autres espèces, comme les ammonites.

Actuellement, de nombreux scientifiques considèrent que les disparitions d'espèces dues aux activités humaines sont suffisamment importantes pour constituer une sixième crise biologique.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Les traces du passé mouvementé de la Terre

La Terre, âgée de 4,57 milliards d'années, est constituée en surface de deux types de croûtes : la croûte continentale et la croûte océanique. De nature différente, elles présentent des caractéristiques bien distinctes. La croûte océanique, sauf exception, n'est pas âgée de plus de 190 millions d'années, alors que la croûte continentale présente des roches d'âges variés, de 4,1 milliards d'années jusqu'à la période actuelle. Quelles sont les traces observables sur la croûte terrestre qui témoignent de l'histoire de la Terre ?

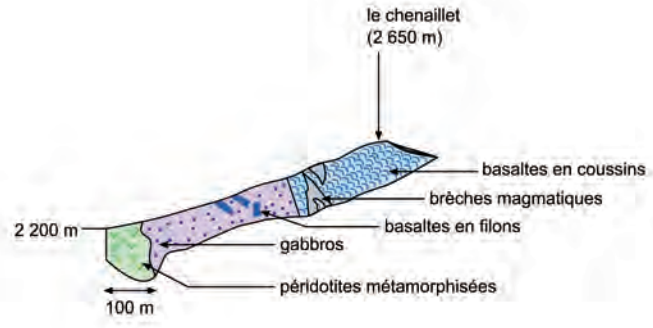
Des domaines continentaux révélant des âges variés

L'étude des fonds océaniques montre l'absence de croûte océanique avant –190 Ma (millions d'années), c'est-à-dire formée devant le Jurassique inférieur. Les gneiss de la formation d'Acasta au Canada, datés de **–4,08 Ga** (milliards d'années), sont considérés comme les plus vieilles roches échantillonnées au monde.

Les âges variés des terrains continentaux sont le résultat de l'histoire de la Terre. Les **domaines continentaux** sont constitués de **cratons**, formés d'un socle rigide granitique et mis en place au Précambrien. Des chaînes de montagnes anciennes et érodées les entourent, formant des **ceintures orogéniques**. En périphérie se trouvent des **chaînes de montagnes plus récentes**. Un **cycle orogénique** est la succession des événements conduisant à la formation d'une chaîne de montagnes, puis à sa disparition, notamment par érosion. Trois grandes phases composent un cycle orogénique : la **sédimentation** dans un bassin sédimentaire, **l'orogenèse** ou formation de chaînes de montagnes, puis la **disparition** de ce relief. Chaque début de cycle orogénique est marqué par une **discordance**, c'est-à-dire la présence de terrains plus récents déposés sur des terrains affectés par le cycle orogénique précédent. À la fin de chaque cycle, les blocs continentaux ne reviennent pas à la situation existant au début du cycle, car des masses continentales nouvellement formées, modifiées tectoniquement et érodées, sont ajoutées à la croûte continentale préexistante, ce qui entraîne sa croissance.

La recherche d'océans disparus

Les **ophiolites** sont des **lambeaux de lithosphère océanique** observables à l'affleurement en **domaine continental** au sein des chaînes de montagnes de collision. Les complexes ophiolitiques sont composés du bas vers le haut de roches mantelliques, les **péridotites**, surmontées par des **gabbros**, puis des **basaltes** formant d'abord un complexe filonien puis se présentant en oreillers. Au niveau des chaînes de collision, les ophiolites forment **une suture ophiolitique,** qui témoigne de la **fermeture d'un ancien domaine océanique**. Dans le cas des Alpes, la formation de l'océan alpin fut suivie par sa fermeture lors de la subduction de la plaque européenne sous la plaque eurasiatique. La faible densité de la lithosphère continentale par rapport à l'asthénosphère a entraîné le



L'ophiolite du Chenaillet dans les Alpes françaises.

NOTIONS-CLÉS

LES MARGES CONTINENTALES PASSIVES

Du côté continental, la marge passive débute par un plateau continental de pente faible, parvenant jusqu'à 200 m de profondeur environ. Puis elle se poursuit par un talus de pente plus forte, qui descend sur une cinquantaine de kilomètres jusqu'à 4 000 m de profondeur. Des canyons sous-marins, lieux de transport de sédiments, sont souvent présents au niveau du talus. Enfin, le glacis continental est situé en eau profonde (de 3 000 à 5 000 m de profondeur), à cheval sur la croûte continentale amincie de la marge et la croûte océanique. Sur le glacis s'accumulent les sédiments transportés par les canyons depuis le continent. Le glacis fait le lien entre le bas du talus et la plaine abyssale, marquant la fin de la marge côté océanique. La croûte continentale, dont l'épaisseur côté continental est 35 km, est amincie jusqu'à 7 km, là où elle rejoint la croûte océanique. La croûte continentale est fracturée en un ensemble de blocs, séparés par des failles normales. Ces blocs d'environ une quinzaine de kilomètres de large sont basculés vers le continent et affaissés vers la croûte océanique. Des sédiments d'âge variés recouvrent la croûte continentale fracturée. Les sédiments anté-rift, formés avant le rifting, sont basculés avec les blocs et affectés par les failles. Les sédiments syn-rift recouvrent les sédiments anté-rift et sont déposés horizontalement sur les blocs basculés. Enfin, les sédiments post-rift recouvrent l'ensemble de la marge passive et de la croûte océanique.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

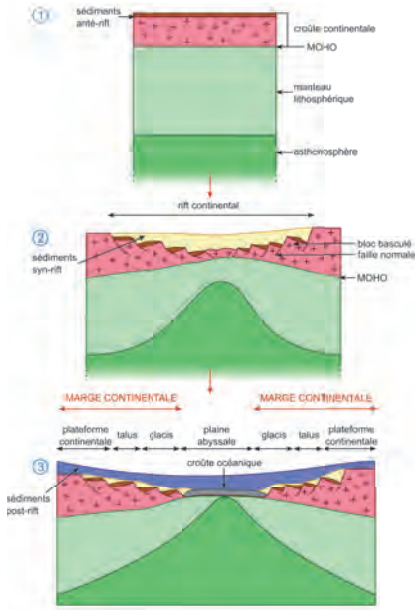
blocage de cette subduction, conduisant à la collision continentale des deux plaques. Cette collision a entraîné **l'exhumation des ophiolites** alpines et la formation de reliefs élevés. Dans d'autres cas, comme au sultanat d'Oman (dans la péninsule arabique), le **recouvrement d'une marge continentale par le plancher océanique,** ou **obduction,** a lieu en absence de subduction et conduit à la présence **d'ophiolites** visibles en surface.

Les marques de la fragmentation continentale et de l'ouverture océanique

La **transition entre la croûte continentale et la croûte océanique** s'effectue au niveau d'une zone appelée **marge continentale**. On distingue les **marges passives**, où la transition entre les deux croûtes s'effectue au niveau d'une **même plaque lithosphérique**, et les **marges actives**, qui correspondent à une frontière de plaques où la lithosphère océanique est en subduction sous la lithosphère continentale.

Les marges passives, contrairement aux marges actives, ne présentent ni activité sismique ni activité volcanique. Elles sont constituées de **blocs basculés, séparés par des failles normales**. Elles sont caractérisées par une croûte continentale fracturée, amincie et étirée, portant les marques de la distension datant de la déchirure initiale du continent avant l'accrétion océanique. Cette **déchirure continentale** (ou **rifting**) consiste en la formation d'un rift, stade initial de l'ouverture d'un océan. Lors d'un **rifting actif**, la remontée de matériel chaud d'origine mantellique est à l'origine d'un bombement régional de quelques centaines de kilomètres, suivi par une extension de la croûte continentale. Ainsi se forment les blocs basculés, les failles normales et le fossé tectonique central ou rift, accompagné d'un volcanisme actif. Puis l'ouverture océanique conduit à la **formation de la croûte océanique** qui s'intercale entre les deux marges continentales. Une invasion marine peut submerger le rift, constituant l'océan. Lors d'un **rifting passif**, des contraintes tectoniques opposées au sein de la lithosphère entraînent un étirement et un amincissement de la croûte, ce qui crée le rift. La diminution de la pression lithosphérique entraîne une remontée de matériel mantellique, à l'origine d'un volcanisme modéré. Ainsi, les stades initiaux de la fragmentation continentale correspondent à la mise en place d'un rift continental. Les marges continentales passives correspondent donc aux **bords auparavant jointifs de l'ancien rift continental**, actuellement séparés par la croûte océanique.

La dynamique de la lithosphère détermine les **différentes périodes paléogéographiques**, caractérisées par la disposition relative des lithosphères continentales et océaniques. Elle se caractérise par la **réunion de blocs continentaux**, conséquence des collisions orogéniques repérées grâce à la présence de sutures ophiolitiques. Ces réunions de blocs continentaux se sont répétées plusieurs fois dans l'histoire de la Terre en formant des **supercontinents**, dont le plus récent, la Pangée, fut constituée au Carbonifère et disloquée au Trias. Ces périodes alternent avec des **périodes de fragmentation continentale**, caractérisées par la mise en place des marges continentales passives, qui conduisent à la mise en place de **nouvelles dorsales océaniques**. Les traces de ces différentes structures géologiques sont les témoins du passé mouvementé de la planète Terre.



Fragmentation continentale et ouverture océanique.

UN ARTICLE DU *MONDE* À CONSULTER

La pluie, tradition bretonne depuis 300 millions d'années p. 26
(David Larousserie, *Le Monde* daté du 28.08.2019)

ZOOM SUR…

LES QUATRE GRANDS CYCLES OROGÉNIQUES EN EUROPE

Le cycle cadomien, de −750 Ma à −540 Ma, a eu lieu au Précambrien. Le cycle calédonien, de −540 à −400 Ma, concerne la 1re partie de l'ère primaire et se caractérise par l'ajout de la chaîne calédonienne du nord de l'Europe, formant une partie de la Scandinavie et de la Grande-Bretagne. Le cycle hercynien ou varisque, de −400 Ma à −250 Ma, a eu lieu pendant la 2de partie de l'ère primaire et a formé la majorité des massifs montagneux anciens en Europe centrale et occidentale (Massif central et Massif armoricain en France). Le cycle alpin, débuté vers −240 Ma au début de l'ère secondaire et qui se poursuit encore, est à l'origine des Alpes et de l'ensemble Pyrénéo-provençal.

LA DIVERSITÉ DES OPHIOLITES

Les quelque 150 ophiolites recensées dans le monde présentent une grande diversité, qui est le reflet de la diversité de leur contexte géodynamique de formation. Les ophiolites se situent entre deux types extrêmes : les LOT (*Lherzolite Ophiolite Types,* comme celles du Chenaillet en France) et les HOT (*Harzurgite Ophiolite Types*, comme celle d'Oman). Les LOT ont une croûte océanique réduite, voire absente, et un manteau dont la péridotite est une lherzolite souvent serpentinisée. Elles proviennent d'une lithosphère océanique formée par une dorsale océanique lente. Les HOT, avec une croûte océanique épaisse et un manteau dont la péridotite est une harzburgite, proviennent d'une lithosphère océanique mise en place au niveau d'une dorsale océanique rapide.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

À la recherche de l'océan alpin (exercice 2)

Le sujet

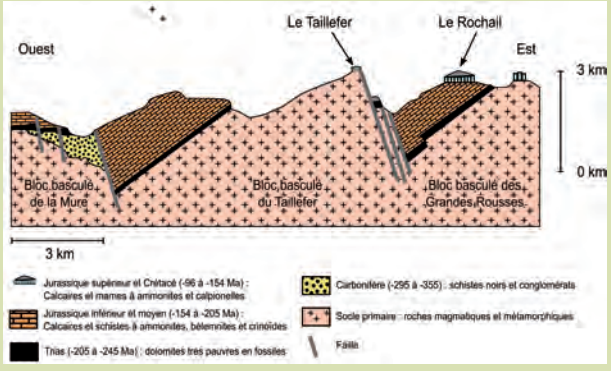
Au cours d'un stage de géologie dans les Alpes, des étudiants cherchent des indices de l'existence d'un ancien océan alpin qui aurait disparu.

À partir des documents proposés et de vos connaissances, présentez des indices témoignant de l'ouverture d'un océan alpin puis de sa fermeture. Vous effectuerez une datation relative du rifting continental à l'origine de l'ouverture de l'océan alpin.

Document de référence – Localisation des différents sites visités lors du stage.

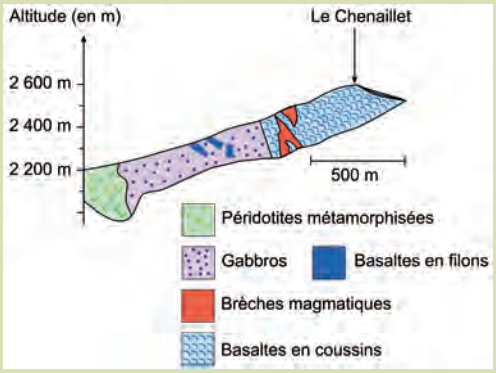
NB : Le document de référence n'est pas à analyser.

Document 1 – Schéma représentant une coupe des blocs basculés* au niveau des massifs de la Mure, du Taillefer et du Rochail.

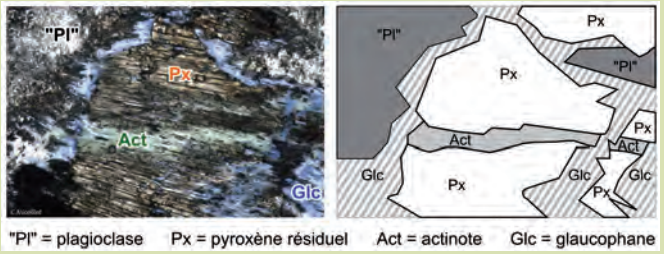


Ammonites et bélemnites : mollusques marins pélagiques (nageant en pleine mer).
Crinoïdes : organismes benthiques (fixés sur les fonds marins).
Calpionelles : organismes unicellulaires marins pélagiques.
*Les blocs basculés sont les vestiges d'une marge continentale passive.

Document 2 – Coupe géologique schématique des ophiolites du Chenaillet.

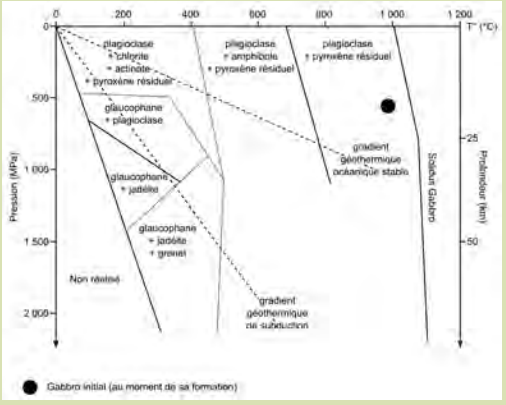


Document 3 – Lame mince de métagabbro à glaucophane trouvé dans la vallée du Guil dans le Queyras.



D'après http://christian.nicollet.free.fr/page/CO/metagabbro.html
D'après P. Fabre, 2008 d'après photographie C. Nicollet.

Document 4 – Les domaines de stabilité des minéraux en fonction de la température et de la pression.



Quelques réactions du métamorphisme :
plagioclase + pyroxène + eau → amphibole
plagioclase + amphibole + eau → chlorite + actinote
plagioclase + actinote + chlorite → glaucophane + eau
plagioclase + glaucophane → grenat + jadéite + eau

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

CE QU'IL NE FAUT PAS FAIRE

Oublier la datation relative du rifting continental.

Le corrigé

La croûte continentale présente des traces de l'histoire du passé mouvementé de la Terre. En Europe, la chaîne alpine est une chaîne de montagnes dont le point culminant est le mont Blanc situé à 4 810 m. Cette chaîne de montagnes intracontinentale, longue d'environ 1 200 km, s'est formée lors de l'orogénèse alpine, à partir de l'ère tertiaire. Lors de l'histoire de la formation des Alpes, un océan alpin a existé. Quels sont les indices témoignant de l'ouverture de cet océan puis de sa fermeture ? Nous allons d'abord étudier les coupes géologiques du massif du Chenaillet pour mettre en évidence l'existence de l'océan alpin, puis celle des massifs de la Mure, du Taillefer et du Rochail pour comprendre comment s'est effectuée son ouverture. Enfin, l'étude des roches du Queyras nous permettra d'expliquer la disparition de cet océan alpin.

I. Existence de l'océan alpin

À l'est du massif du Pelvoux, à proximité des zones internes des Alpes, le massif du Chenaillet, culminant à 2 600 m d'altitude, présente un affleurement particulier, constitué de bas en haut de péridotites serpentinisées, de gabbros puis de basaltes (document 1). Or les péridotites, les gabbros et les basaltes sont des roches caractéristiques de la lithosphère océanique. Ainsi, dans les Alpes vers 2 600 m d'altitude se trouve un fragment de lithosphère océanique en domaine continental, constituant une ophiolite. La présence de cette ophiolite alpine traduit l'existence passée d'un océan alpin. Quels sont les indices présents dans les Alpes qui témoignent de l'ouverture de cet océan ?

II. Ouverture de l'océan alpin

Le document 2 présente une coupe géologique des massifs de la Mure, de Taillefer et du Rochail, situés dans la zone externe des Alpes, à l'ouest du massif du Pelvoux. La coupe géologique montre que le socle est découpé par des failles normales séparant les blocs basculés des Grandes Rousses, de Taillefer et de la Mure. Or, ces blocs basculés séparés par des failles normales sont les vestiges d'une ancienne marge océanique passive (zone de transition entre la lithosphère océanique et la lithosphère continentale), formée lors de l'ouverture d'un océan alpin. Cette ouverture débute par un rifting, c'est-à-dire une déchirure au sein d'un continent. L'application des principes de la datation relative permet de dater le rifting continental à l'origine de l'ouverture de l'océan alpin. Les failles et le basculement affectent les calcaires et les schistes à ammonites, bélemnites et crinoïdes, datés du Jurassique inférieur et moyen (–250 à –154 Ma), mais n'affectent pas les calcaires et les marnes à ammonites et calpionelles du Jurassique supérieur et du Crétacé (–154 à –96 Ma) (document 3). Or, selon le principe de recoupement, toute structure qui en recoupe ou en affecte une autre lui est postérieure. Les failles témoignant de la déchirure continentale ont donc eu lieu après la formation des roches datant du Jurassique inférieur et moyen, et avant la formation de celles datant du Jurassique supérieur et du Crétacé. L'océan alpin s'est donc formé il y a environ 150 Ma par une tectonique en extension provoquant une déchirure continentale. Ce rifting a entraîné la mise en place de marges passives ; celle située au nord-ouest de l'océan alpin correspond actuellement aux massifs de la Mure, de Taillefer et du Rochail. Le rifting s'est poursuivi par la mise en place d'une dorsale océanique, qui a formé de la lithosphère océanique dont un fragment est observable au massif du Chenaillet. Plus tard, l'océan alpin s'est refermé. Comment s'est effectuée cette fermeture ?

III. Fermeture de l'océan alpin

Le métagabbro récolté dans la vallée du Guil dans le Queyras est une roche métamorphique, contenant des minéraux métamorphiques (l'actinote et le glaucophane) et des minéraux résiduels (des plagioclases et du pyroxène) (document 3). Ce métagabbro provient de la transformation d'un gabbro initialement présent au sein de la croûte océanique, constitué de plagioclases et de pyroxène. D'après le document 4, la présence d'actinote et de glaucophane dans ce métagabbro montre qu'il a été soumis à une température de 200 °C, à une profondeur de 25 km. Or, le géotherme de subduction indique que ces conditions de température et de profondeur sont celles existant au niveau d'une zone de subduction. Ainsi, le gabbro formé initialement au niveau de la dorsale de l'océan alpin s'est éloigné de celle-ci, et les réactions métamorphiques caractérisées par des hydratations ont formé l'actinote. Puis l'enfouissement du métagabbro lors de la subduction s'est accompagné de réactions de déshydratation à l'origine du glaucophane. La présence du métagabbro de la vallée du Guil indique donc que l'océan alpin s'est fermé par subduction. La subduction puis les phénomènes tectoniques ultérieurs ont alors entraîné la formation d'ophiolites dans les Alpes, comme celle du Chenaillet.

Ainsi, l'ophiolite du Chenaillet prouve l'existence d'un océan qui a existé dans les Alpes. Vers –150 Ma, un rifting continental a conduit à l'ouverture de l'océan alpin, comme le montrent les restes des marges massives occidentales de cet océan. La dorsale océanique a produit de la lithosphère océanique. Puis une subduction, mise en évidence par les roches métamorphiques de la croûte océanique subduite, a entraîné la fermeture de cet océan. Les conséquences de cette géodynamique ont été la formation des reliefs de la chaîne alpine, avec présence de sutures ophiolitiques. Comment expliquer la modification des contextes géodynamiques lors de l'histoire alpine avec le passage d'un contexte de divergence, à l'origine de la formation de l'océan alpin à un contexte de convergence entraînant la subduction et la collision ?

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

La pluie, tradition bretonne depuis 300 millions d'années

Géologie – L'analyse de roches granitiques a permis de comprendre le régime des précipitations lors de la formation du massif armoricain

Après avoir arpenté le Morbihan avec son marteau de géologue, Camille Dusséaux l'a scientifiquement prouvé : il pleut en Bretagne depuis au moins 300 millions d'années. *« Cela fait sourire mais cela n'a pas été facile à démontrer. Trouver d'aussi anciennes eaux de pluie, sans doute parmi les plus vieilles du monde, est quelque chose qui m'a fait rêver »*, souligne la post-doctorante, qui vient de finir sa thèse à l'université de Plymouth (Angleterre) et qui a présenté ses étonnants résultats à la conférence de géochimie Goldschmidt à Barcelone le 21 août.

Ces pluies ont donc été retrouvées au cœur des granites du massif armoricain, dans plusieurs dizaines d'échantillons recueillis dans le Morbihan. Elles ne sont pas sous forme de gouttes, mais intégrées dans le minéral, à hauteur de 4 %, comme dans une éponge. A leur manière, ces histoires d'eau racontent celle de la Bretagne, mais aussi de toute la chaîne varisque qui court de l'Amérique du Nord à l'Asie en passant par le massif central et la pointe bretonne.

Cette vaste région était en fait la frontière du rapprochement, débuté il y a 500 millions d'années, entre deux continents, Gondwana, au sud, et le Laurussia, au nord, pour former la Pangée il y a 300 millions d'années. Elle-même se disloquera 100 millions d'années plus tard, pour aboutir aux plaques actuelles. De ces hautes montagnes initiales, il ne reste en France, après des millions d'années d'érosion, que les « racines ». Et donc aussi des traces d'eau susceptibles de renseigner sur les altitudes et les conditions de circulation des fluides de l'époque.

Pour analyser ces indices, la géologue s'est associée à de nombreux spécialistes des universités de Rennes, Lille, Montpellier, Lyon, Portsmouth (Angleterre) et Francfort (Allemagne), dans le but notamment de déterminer la composition exacte de cette eau.

Certes la formule chimique de l'eau est toujours H_2O, un atome d'oxygène lié à deux hydrogènes, mais l'hydrogène peut être plus ou moins lourd, c'est-à-dire contenir un neutron de plus dans son noyau constitué d'un unique proton. Or la quantité d'hydrogène lourd, appelé deutérium, varie selon la température de l'air au moment des précipitations, ainsi qu'en fonction des interactions avec les roches et des températures ou pressions environnantes.

Rôle de l'argon

Si bien qu'il est possible, en comparant avec divers étalons, de savoir si l'on a affaire à une eau tombée du ciel, dite météorique, ou à une eau des profondeurs, dite magmatique ou métamorphique, mélange de gaz, de fluide et de roches. Il est aussi possible d'estimer la latitude et l'altitude des éventuelles précipitations.

Quant à la datation, elle est donnée par le contenu en argon de ces roches. Cet élément possède lui aussi des cousins plus ou moins lourds et a le bon goût de se désintégrer radioactivement, fournissant ainsi une sorte d'horloge naturelle. *« J'ai passé des mois à casser des échantillons en petites paillettes, puis à les trier, pour analyser ensuite ce ratio entre hydrogène et deutérium »*, se souvient Camille Dusséaux.

Premier enseignement, il reste bel et bien de l'eau de pluie âgée de 300 millions d'années. Or comme le relief s'est érodé depuis le Carbonifère, c'est donc que cette eau s'est infiltrée par des failles jusqu'à plusieurs kilomètres dans la croûte, afin d'affleurer de nos jours. Les indices géologiques de surface permettent de savoir à quelles température et pression les roches visibles actuelles se sont formées et donc d'estimer la distance parcourue : jusqu'à six kilomètres pour les eaux de pluie. Deuxième constat, ces techniques d'abord éprouvées depuis les années 2000 sur des massifs plus jeunes comme la Cordillère nord-américaine ou l'Himalaya (80 millions d'années), permettent de remonter plus loin encore dans le temps. Troisième conclusion, ces mesures confirment que la « Bretagne » était à l'époque au niveau de l'équateur, une zone où les précipitations ne contenaient pas les mêmes quantités de deutérium qu'aux pôles.

« D'autres mesures, présentes dans ma thèse, non encore publiée, penchent aussi pour dire que l'altitude de ces montagnes était davantage comparable à celles des Alpes qu'à l'Himalaya », avance Camille Dusséaux. De quoi clore un vieux débat entre les tenants de ces deux hypothèses. *« L'étude est solide et les auteurs ont évalué les différentes hypothèses possibles pour expliquer les quantités de deutérium. Cela pourrait en effet servir à estimer la hauteur de ces anciennes montagnes pour lesquelles il y a peu d'indices pour l'instant »*, note Catriona Menzies, de l'université d'Aberdeen (Ecosse).

Mais l'intérêt n'est pas seulement de connaître l'altitude du relief breton originel. Cette vieille eau raconte aussi comment se sont formés des gisements comme ceux d'uranium. Le fluide, en circulant dans les minéraux, concentre ces derniers dans certaines zones.

« Nous avons estimé que les eaux de pluie ont circulé dans le sous-sol pendant 20 millions d'années pour accumuler l'uranium », précise Camille Dusséaux. En passant, cela remet en lumière une autre spécificité bretonne ou limousine : la présence dans l'air de gaz radon radioactif, produit de la désintégration de ces atomes d'uranium instables portés par les eaux.

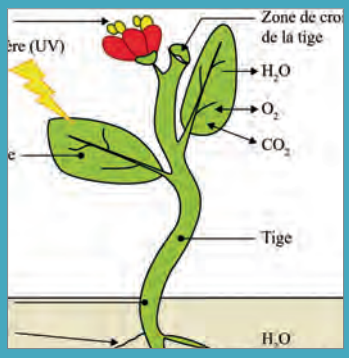
David Larousserie,
Le Monde daté du 28.08.2019

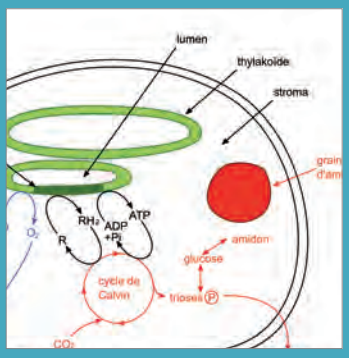
POURQUOI CET ARTICLE ?

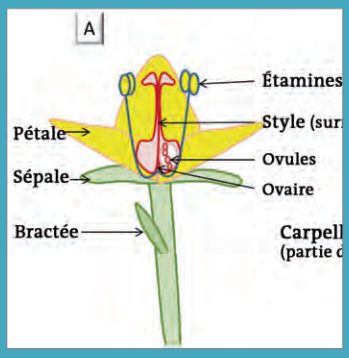
Les roches des domaines continentaux révèlent des âges variés : ainsi, en Bretagne, le Massif armoricain, dont les roches sont datées de 300 millions d'années, correspond aux vestiges de l'ancienne chaîne de montagnes varisque formée au sein de la Pangée. Le Massif armoricain actuel, dont l'attitude moyenne est d'environ 100 m, correspond à la racine de la chaîne de montagnes résultant d'une longue érosion. **Cet article montre que l'étude récente de cette ancienne chaîne de montagnes apporte des informations intéressantes sur cette ceinture orogénique.**

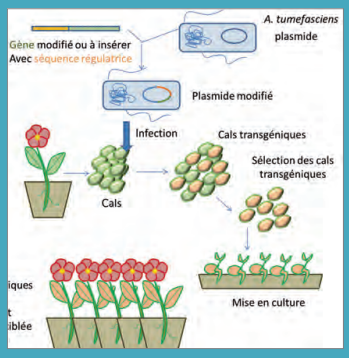
© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

DE LA PLANTE SAUVAGE À LA PLANTE DOMESTIQUÉE









© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

L'organisation fonctionnelle des plantes à fleurs

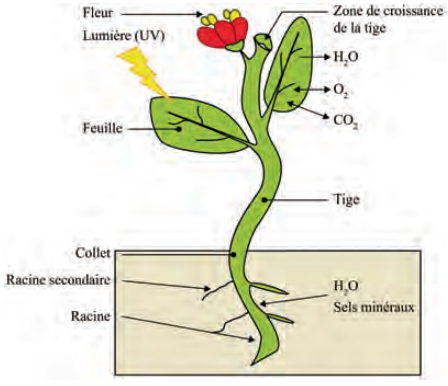
À la différence des animaux généralement mobiles dans leur environnement (qui peuvent donc chercher leur nourriture, se protéger des agressions du milieu, etc.), la plante se caractérise par une vie fixée à l'interface entre l'atmosphère et le sol. Comment l'organisation fonctionnelle des plantes à fleurs est-elle adaptée à leur mode de vie ? Comment cette organisation se met-elle en place ?

De vastes surfaces d'échanges entre la plante et son milieu

Les plantes étudiées ici, les Angiospermes ou plantes à fleurs, sont formées d'un **appareil végétatif**, constitué de **racines** ancrées dans le **sol** et qui portent des **tiges feuillées** qui se développent en milieu aérien, au contact de **l'atmosphère**. En raison de sa vie fixée, la plante réalise des **échanges d'énergie et de matière** avec le milieu par l'intermédiaire de surfaces d'échanges externes très développées.

La partie souterraine de la plante est constituée de l'appareil racinaire, qui assure à la fois **l'ancrage** du végétal et **l'absorption de l'eau et des ions minéraux** du sol, indispensables à la **photosynthèse**. Les racines des plantes possèdent des structures spécialisées pour cette absorption : les **poils absorbants**. Ils forment une surface d'échange importante avec le sol. Chez de nombreuses espèces végétales, la surface d'absorption racinaire est augmentée par des **associations symbiotiques** entre la plante et des champignons, les **mycorhizes**.

Les **feuilles**, portées par les tiges, sont le lieu de **collecte de l'énergie lumineuse** et **d'échanges de gaz avec l'atmosphère**. Elles sont formées de cellules chlorophylliennes qui, à partir d'eau et du dioxyde de carbone atmosphérique, synthétisent des glucides lors de la photosynthèse. Les échanges de molécules gazeuses de CO_2, d'O_2 et d'H_2O entre les feuilles et l'atmosphère s'effectuent au niveau de structures spécialisées : les **stomates**.



Organisation d'une plante à fleurs et échanges avec le milieu.

La circulation de matière au sein de la plante

Dans la plante, des **échanges de matière** sont indispensables entre les parties souterraines, lieu de l'absorption des sels minéraux et de l'eau, et les parties aériennes photosynthétiques. Ces échanges ont lieu dans deux réseaux distincts de **vaisseaux conducteurs** : le **xylème** transporte la **sève brute** (composée d'eau et de sels minéraux) des racines vers le reste de la plante, tandis que le **phloème** transporte la **sève élaborée** (riche en glucides produits par les feuilles) vers les autres organes consommateurs de la plante.

Le développement de la plante

L'architecture de la plante est le résultat de la mise en place des différents organes et de leur croissance en longueur, aussi bien qu'en largeur. La **croissance en longueur** des racines et des tiges est localisée à leur extrémité.

MOTS-CLÉS

PLANTE
Végétal terrestre dont les racines et les tiges feuillées sont reliées par des tissus conducteurs. Parmi les plantes, on distingue notamment les plantes à fleurs (les Angiospermes) et les plantes sans fleurs (les Gymnospermes) dont les principaux représentants sont les pins et les sapins.

STOMATE
Structure située au niveau de l'épiderme des feuilles, qui permet les échanges de gaz (CO_2, O_2 et H_2O) entre la feuille et l'atmosphère. Un stomate est constitué de deux cellules épidermiques spécialisées, les cellules stomatiques, encadrant un orifice, l'ostiole. L'ouverture de l'ostiole permet le passage des gaz entre l'atmosphère et la cavité située sous l'ostiole (la chambre sous-stomatique), lieu des échanges gazeux avec les cellules chlorophylliennes. Les stomates, situés majoritairement sur la face inférieure des feuilles, présentent une ouverture régulée en fonction des conditions climatiques, ce qui permet de limiter la perte d'eau au niveau des feuilles.

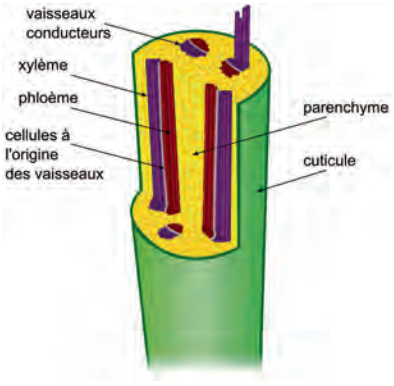
APEX
Extrémité d'une tige ou d'une racine, contenant un méristème apical.

BOURGEON FOLIAIRE
Organe constitué de très jeunes feuilles, situé sur un axe court, et responsable de la croissance en longueur et de la ramification des tiges. Le bourgeon foliaire peut être terminal (à l'extrémité de la tige principale) ou axillaire (permettant la formation des tiges latérales).

MÉRISTÈME APICAL
Tissu végétal contenant des cellules indifférenciées qui se multiplient activement par mitose et permettent la croissance en longueur des tiges ou des racines.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Au niveau de la **racine**, la croissance s'effectue dans le **méristème racinaire** situé de quelques millimètres à quelques centimètres de l'extrémité racinaire. Ce méristème est constitué de **cellules indifférenciées** de petite taille, qui se divisent activement. Les cellules nouvellement formées, situées le plus près de l'extrémité racinaire, continuent leurs divisions. Les autres cellules, situées plus loin de cette extrémité, cessent leurs divisions, subissent une **élongation cellulaire** dans le sens de la longueur de la racine, puis **se différencient** en formant les différents tissus racinaires.



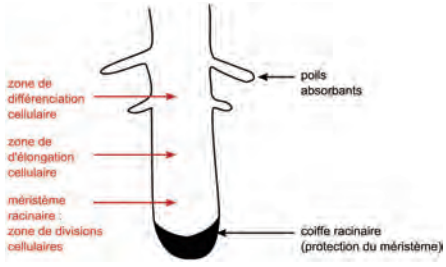
Les vaisseaux conducteurs dans la tige.

Le développement de la tige principale s'effectue au niveau du **bourgeon apical,** situé à son extrémité. Une **tige** est formée d'une succession de **nœuds**, où s'insèrent les feuilles, séparés par des régions dépourvues de feuilles, les **entre-nœuds**. Les **bourgeons axillaires,** situés au niveau de l'insertion de chaque feuille sur la tige principale, permettent le développement de **ramifications**. Les bourgeons apicaux et axillaires présentent la même organisation : ils sont constitués d'un **méristème apical caulinaire** (c'est-à-dire formant les tiges et les feuilles), localisé à leur extrémité et recouvert **d'ébauches de feuilles.** Ces ébauches foliaires, d'autant plus jeunes qu'elles sont proches du méristème apical caulinaire, portent chacune à leur aisselle un amas de **cellules méristématiques**. Ces cellules **indifférenciées** et de petite taille **se divisent**, produisant les ébauches foliaires et les massifs de cellules méristématiques associés. Une partie des cellules produites par le méristème apical caulinaire cessent de se diviser, **s'allongent** dans le sens de la longueur de la tige, puis se **différencient** en formant les tissus des tiges et des feuilles. Les massifs de cellules méristématiques situés à l'aisselle des ébauches foliaires forment les bourgeons axillaires. Le développement des ramifications de la tige à partir des bourgeons axillaires est semblable à celui de la tige à partir du bourgeon apical. La tige présente ainsi une **organisation modulaire** sous forme de **phytomères** caulinaires, formés chacun d'une courte partie supérieure, le nœud, superposée à une partie inférieure plus ou moins allongée, l'entre-nœud. La géométrie de l'empilement des phytomères et leur fonctionnement déterminent l'architecture de la plante.

Le contrôle du développement

La **morphologie** de la plante résulte de la disposition des différents organes, mis en place lors de son **développement**. Cette morphologie dépend de **facteurs génétiques** mais aussi des **conditions du milieu**. En effet, des végétaux d'espèces différentes peuvent présenter des morphologies semblables dans un même environnement. De **nombreux facteurs environnementaux** modifient la morphologie des plantes : gravité, température, luminosité, vent, salinité…

L'influence de ces nombreux facteurs environnementaux s'explique par l'intervention **d'hormones végétales** agissant au niveau de la plante. **L'auxine**, première phytohormone découverte, active **l'élongation cellulaire des tiges**, stimulant leur croissance en longueur. L'action de l'auxine explique la croissance orientée des tiges éclairées latéralement vers cette source de lumière. L'auxine stimule aussi la **différenciation cellulaire au niveau des racines**, favorisant la formation des racines secondaires. De nombreuses autres hormones végétales (éthylène, acide abscissique, gibbérellines, cytokinines, etc.) interviennent lors du développement de la plante.



Le développement des tiges : organisation d'un bourgeon.

ZOOM SUR…

LES SURFACES D'ÉCHANGES DES VÉGÉTAUX

La présence de vastes surfaces d'échanges chez les plantes est à mettre en relation avec leur mode de vie fixée et la relative pauvreté de leur milieu de vie (eau et ions en faible quantité dans le sol, CO_2 peu abondant dans l'atmosphère). La surface moyenne d'échange des nutriments, de l'eau et des ions est d'environ 3 m^2 par unité de masse pour un animal, alors qu'elle est de plusieurs centaines de m^2 par unité de masse pour un végétal. La grande surface développée par les feuilles permet aussi de capter une quantité importante de lumière. De plus, les surfaces d'échanges des plantes avec le milieu sont des surfaces externes, tandis que celles des animaux sont des surfaces internes (alvéoles pulmonaires, microvillosités intestinales, par exemple).

LES ASSOCIATIONS SYMBIOTIQUES DES RACINES

La surface d'absorption racinaire de nombreuses plantes est fortement augmentée grâce à une symbiose avec des champignons : les mycorhizes. Ils fournissent la plante en sels minéraux du sol (comme les ions phosphate), tandis que la plante leur fournit des glucides produits lors de la photosynthèse. Les plantes de la famille des Fabacées (ou Légumineuses, comme le pois et la lentille) vivent une symbiose avec des bactéries du genre Rhizobium localisées au niveau de nodosités racinaires. Ces bactéries fixent le diazote de l'air et fournissent des composés azotés à la plante qui leur procure de la matière organique, produite lors de photosynthèse.

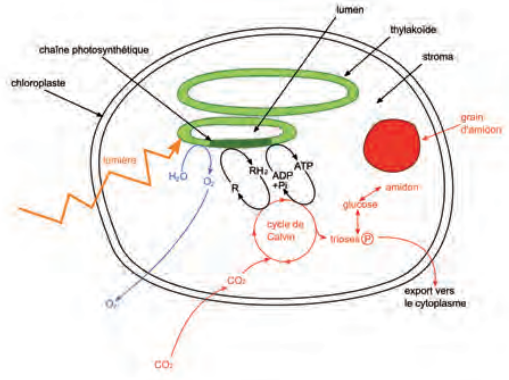
© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

La plante, productrice de matière organique

Les plantes chlorophylliennes sont capables de réaliser la photosynthèse, c'est-à-dire la synthèse de matière organique à partir de matière minérale prélevée dans le milieu, en présence d'énergie lumineuse. Comment la plante réalise-t-elle cette synthèse ? Quelles sont les fonctions biologiques des molécules produites à partir de la photosynthèse ?

La photosynthèse

L'équation-bilan de la photosynthèse est la suivante : $6CO_2 + 6H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2$. Elle a lieu dans les **cellules chlorophylliennes** des parties aériennes de la plante, majoritairement les **feuilles**. Elle se déroule dans un organite intracellulaire spécialisé : le **chloroplaste**. La première phase de la photosynthèse, la **phase photochimique**, a lieu au niveau des **chaînes photosynthétiques**, constituées de **pigments chlorophylliens** associés à des protéines, et localisées dans la membrane des thylakoïdes (structures membranaires en forme de sacs aplatis). L'absorption de la lumière par les pigments chlorophylliens, dont la **chlorophylle**, entraîne des **transferts d'électrons** le long de la chaîne photosynthétique. Ces réactions s'accompagnent de **l'oxydation de l'eau**, ou photolyse de l'eau, qui libère de l'O_2, selon l'équation-bilan suivante : $2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$. Le transfert d'électrons au niveau de la chaîne photosynthétique permet la production, dans le stroma, **d'ATP** (Adénosine Triphosphate, molécule riche en énergie) et de **molécules réduites** RH_2 (molécules capables de libérer des électrons).



La photosynthèse.

La seconde phase de la photosynthèse est la **phase chimique** qui a lieu dans le stroma. L'ATP et les RH_2 produits lors de la phase photochimique sont utilisés pour **fixer du CO_2** selon un ensemble de réactions, appelé **cycle de Calvin**, qui permet la synthèse de **molécules organiques**. La première molécule formée à l'issue du cycle de Calvin est un glucide à trois atomes de carbone, un **triose-phosphate**, l'APG (3-phosphoglycérate). Puis, l'association de deux APG permet la synthèse d'un glucide à six atomes de carbone, le **glucose** ($C_6H_{12}O_6$). Ainsi la phase chimique permet la réduction du **CO_2** en carbone organique.

Le devenir des produits de la photosynthèse

La journée, à la lumière, les trioses-phosphates synthétisés lors de la photosynthèse dans le chloroplaste forment du **glucose**, qui est polymérisé en **amidon**. Cet amidon, conservé en **grains** dans le stroma du chloroplaste, constitue la **forme de stockage temporaire** des glucides lorsque les trioses-phosphates sont produits en excès. Certains trioses-phosphates passent également dans le cytoplasme de la cellule chlorophyllienne et forment du glucose puis du **saccharose**, alors exporté hors de la cellule pour rejoindre la **sève élaborée** circulant dans le **phloème**. Le saccharose est la **principale forme de transport des glucides** dans la sève élaborée, permettant ainsi l'alimentation en matière organique

NOTIONS-CLÉS

CHLOROPLASTE

Organite intracellulaire spécifique des cellules chlorophylliennes, le chloroplaste contient une double membrane qui délimite le stroma. Dans celui-ci sont présents des saccules membranaires longs et aplatis, appelés thylakoïdes (ou thylacoïdes). Des empilements de petits thylakoïdes forment les grana (granum au singulier). La membrane des thylakoïdes abrite les chaînes photosynthétiques, constituées de nombreuses protéines (dont la chlorophylle) et souvent associées en complexes. Le stroma contient des grains d'amidon, de l'ADN circulaire, des ribosomes (avec des ARNr ou ARN ribosomaux), des ARNt (ARN de transfert), et des ARNm (ARN messagers). Les gènes portés par l'ADN chloroplastique permettent la synthèse des ARNt, des ARNr, des protéines ribosomales et d'une quinzaine d'autres protéines chloroplastiques. Chaque chloroplaste est issu d'un chloroplaste préexistant. Les chloroplastes se divisent lors de l'interphase, indépendamment des divisions de la cellule les abritant. Au niveau des feuilles, les cellules méristématiques contiennent des proplastes (ou plastes indifférenciés), qui se différencient à la lumière en chloroplastes présentant des thylakoïdes et des pigments photosynthétiques. Le chloroplaste, spécialisé dans la photosynthèse, est un organite semi-autonome, dont la présence dans les cellules végétales est le résultat d'une endosymbiose passée d'une cyanobactérie photosynthétique dans une cellule initialement hétérotrophe.

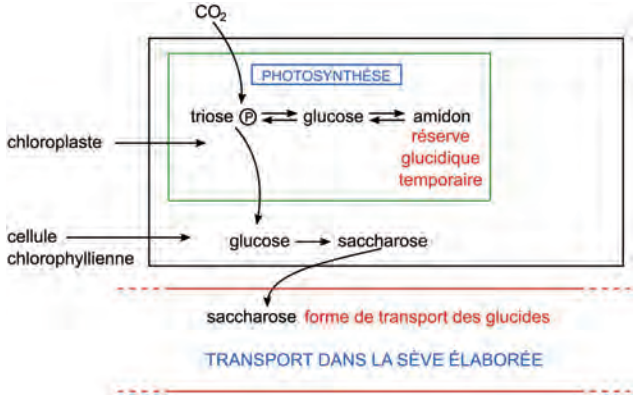
© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

des autres cellules de la plante. La nuit, en l'absence de photosynthèse, l'amidon stocké dans le chloroplaste est hydrolysé en trioses-phosphates, qui forment du saccharose circulant dans la sève élaborée : cela permet l'approvisionnement de la plante en continu.

Les produits de la photosynthèse présents dans la sève élaborée circulent dans les organes du végétal, où ils sont transformés, sous l'action **d'enzymes**, en molécules assurant différentes fonctions biologiques. Ainsi, le **stockage de la matière organique** s'effectue sous plusieurs formes (glucides, lipides ou protéines) au sein d'**organes spécialisés** dans la mise en réserve, ainsi que dans les **graines** et les **fruits**. Ce stockage permet aux plantes de résister aux conditions défavorables et d'assurer leur reproduction sexuée ou asexuée. Les organes spécialisés dans le stockage des réserves, qui permettent la multiplication asexuée, sont les **rhizomes** (tiges souterraines, comme celles du sceau de Salomon), les **bulbes** (tiges entourées de feuilles modifiées, comme celles de l'oignon) ou encore les **tubercules,** (tiges souterraines, comme celles de la pomme de terre). Les cellules de ces organes stockent souvent l'amidon au sein d'un organite intracellulaire, **l'amyloplaste**. Les graines possèdent des réserves en quantité et nature variables selon les espèces, qui sont utilisées par l'embryon lors de la **germination**. Les fruits peuvent également être riches en réserves glucidiques (comme de nombreux fruits de consommation courante tels que la pomme, la poire, le raisin, etc.), ou lipidiques (comme l'olive ou l'avocat).

D'autres molécules issues du **métabolisme des produits de la photosynthèse** contribuent à la **croissance** et au **port de la plante**. La **cellulose**, glucide polymère de glucose, est le constituant principal de la **paroi** des cellules végétales et leur confère à la fois la solidité et une certaine élasticité compatible avec leur croissance. La **lignine** regroupe des substances hydrophobes contenant un noyau aromatique, et imprégnant la paroi des cellules végétales de certains tissus. Cela les rend inextensibles et les rigidifie. Chez les espèces ligneuses, les vaisseaux du xylème responsables du transport de la sève brute dans la plante sont lignifiés, formant le **bois**. La rigidité de ce tissu lui permet d'assurer un rôle de soutien et contribue à la réalisation du port arboré.

D'autres molécules issues du métabolisme des produits de la photosynthèse participent aux **interactions avec d'autres espèces**, notamment animales. Par exemple, les **tanins**, substances aromatiques présentes dans différents tissus végétaux, assurent une **protection contre les parasites** (bactéries ou champignons) ou contre **les prédateurs herbivores**. Ils interagissent en effet avec la salive des herbivores, provoquant un effet astringent désagréable. Un autre exemple est celui des **anthocyanes**, pigments responsables de la coloration rouge à violette de certains fruits (comme le raisin), fleurs et feuilles. Elles participent à des **interactions mutualistes** en attirant des animaux pollinisateurs. Ces pigments protègent aussi la plante des prédateurs herbivores en teintant les feuilles qui miment des feuilles mortes. Ainsi, les produits de la photosynthèse sont métabolisés dans la plante en différentes molécules qui présentent une **grande diversité chimique**.



Le devenir des produits de la photosynthèse.

DATES-CLÉS

LES GRANDES ÉTAPES DE L'ÉTUDE DE LA PHOTOSYNTHÈSE :

1780 : Mise en évidence du rejet d'O_2 par les plantes (Priestley).
1782 : Mise en évidence de l'absorption du CO_2 atmosphérique (Senebier).
1864 : Mise en évidence de la synthèse d'amidon dans les feuilles des plantes (Sachs).
1935 : Hypothèse du couplage de l'oxydation de l'eau avec la réduction du CO_2, grâce à un intermédiaire transporteur d'électrons (Franck).
1937 : Réaction de Hill, confirmant l'hypothèse de Franck.
1961 : Identification des produits formés à partir du CO_2 dans le stroma du chloroplaste (cycle Calvin-Benson-Bassham).

ZOOM SUR…

LES INTERACTIONS CHIMIQUES ENTRE PLANTES ET ANIMAUX

Dans les savanes d'Afrique du Sud, des gazelles appelées koudous se nourrissent des feuilles d'un arbre, *Acacia caffra*. Les chercheurs ont mis en évidence que les acacias étaient capables de produire des tanins au goût amer qui perturbent la digestion des herbivores comme les koudous. À faible dose, ces tanins dissuadent les herbivores de consommer les feuilles d'acacias. Mais dans les années 1980, l'aménagement de parcelles clôturées par les fermiers a modifié la répartition des koudous, qui ont augmenté la prédation de certains acacias. Le taux de tanins des feuilles de ces arbres a augmenté, entraînant la mort des koudous herbivores. De plus, en cas de prédation, les acacias émettent un gaz, l'éthylène, qui peut déclencher chez les arbres voisins la production de tanin.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

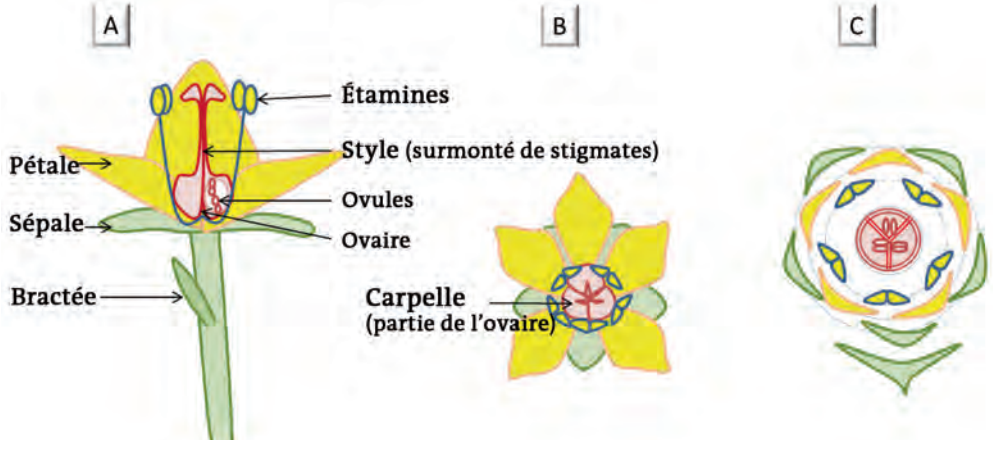
Reproduction de la plante entre vie fixée et mobilité

Les plantes à fleurs ont une vie fixée à l'interface entre le sol et l'atmosphère. Quelles sont les différentes modalités de la reproduction asexuée et de la reproduction sexuée des plantes à fleurs ?

La reproduction asexuée des plantes

Lors de la **reproduction asexuée**, un individu seul produit un ou plusieurs autres individus sans l'intervention d'un autre partenaire, et donc sans fécondation entre un gamète mâle et un gamète femelle. La reproduction asexuée chez les végétaux, également appelée multiplication végétative, peut être **naturelle** ou **artificielle**, c'est-à-dire provoquée par l'homme. La reproduction asexuée naturelle s'effectue selon différentes modalités. Par exemple, lors du **bouturage**, une partie de l'appareil végétatif se sépare de la plante initiale, forme spontanément les parties manquantes et reconstitue un végétal complet. Une autre modalité de reproduction asexuée chez les végétaux est le **marcottage**. Lors de celui-ci, une partie de la plante initiale forme sur elle tous les organes nécessaires à la vie de la future plante ; ces organes constituent un nouvel individu après séparation de la plante initiale. La multiplication asexuée permet aux plantes de **coloniser de nouveaux milieux**.

La reproduction asexuée est également réalisée de manière **artificielle** en laboratoire de recherche, en agronomie ou en horticulture. Depuis les années 1960, différents types de **cultures de plantes** *in vitro* ont été mis au point et sont utilisés de manière **industrielle**. L'une de ces techniques est la **culture de méristèmes apicaux**. Elle consiste à prélever un méristème de tige d'une plante initiale, puis à le cultiver *in vitro* pour obtenir une microbouture. Celle-ci est fragmentée en plusieurs petites microboutures, qui vont se multiplier sur un milieu nutritif enrichi en hormones végétales favorisant la formation des bourgeons, puis sur un milieu riche en auxine stimulant le développement des racines. Des plants de petite taille, munis de racines et de tiges feuillées, sont ainsi obtenus en grand nombre. Ces plants, repiqués dans des pots, sont ensuite cultivés normalement. Cette technique de culture *in vitro* permet d'obtenir rapidement de nombreux



A : coupe transversale de la fleur, B : vue de dessus de la fleur, C : diagramme floral
L'organisation de la fleur.

NOTIONS-CLÉS

POLLINISATION
Transport des grains de pollen des étamines jusqu'au pistil d'une fleur, par différents vecteurs (vent, eau, animaux, etc.).

AUTOFÉCONDATION ET FÉCONDATION CROISÉE
La majorité des plantes portent des fleurs hermaphrodites ou bisexuées, contenant à la fois un organe reproducteur mâle, les étamines, et un organe reproducteur femelle, le pistil. Mais chez certaines espèces dites monoïques, comme le maïs, un individu porte sur un même pied des fleurs mâles (avec des étamines mais sans pistil) et des fleurs femelles (avec un pistil mais sans étamines). Chez les espèces dioïques comme le saule, chaque individu ne porte qu'un type de fleurs unisexuées, soit mâles, soit femelles. L'autofécondation qui a lieu entre un grain de pollen et l'ovule issus d'un même individu est donc impossible chez les espèces dioïques. Cette autofécondation est source d'homozygotie (présence de 2 allèles identiques pour un gène donné) importante chez les descendants, pouvant réduire les possibilités d'adaptation des individus aux variations de l'environnement. Chez de nombreuses espèces monoïques ou hermaphrodites, l'autofécondation, théoriquement possible, est rendue impossible par des barrières morphologiques, temporelles ou le plus souvent génétiques (mécanismes d'auto-incompatibilité).

DISSÉMINATION
Transport des graines ou des fruits contenant des graines. Les principaux agents disséminateurs sont le vent, l'eau et les animaux. La dissémination assure le maintien de l'aire de répartition de la plante et son extension.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

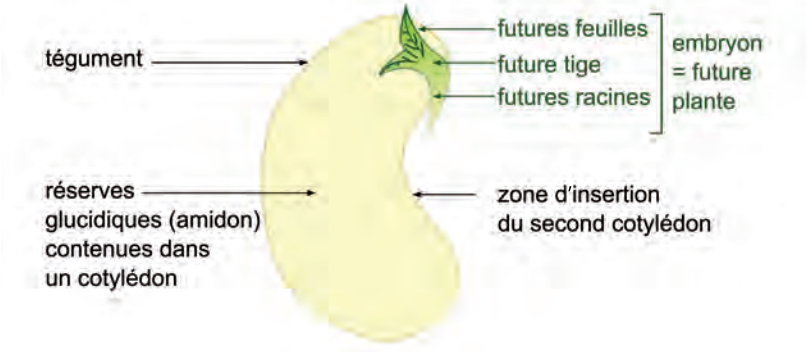
plants identiques et dépourvus d'agents pathogènes (comme les virus).

La reproduction asexuée des plantes repose sur l'importante capacité de régénération de la plupart des tissus végétaux. De nombreuses cellules végétales présentent en effet une **totipotence**, c'est-à-dire qu'elles sont capables, placées dans des conditions adéquates, de régénérer un individu entier en passant, si besoin, par une étape de dédifférenciation cellulaire (les cellules redeviennent alors indifférenciées). La reproduction asexuée des plantes repose aussi sur leurs capacités de **croissance indéfinie** : les différents organes sont mis en place successivement de manière séquentielle et grandissent à partir des méristèmes.

La reproduction sexuée des plantes

Chez les Angiospermes, la **reproduction sexuée** est assurée par l'organe reproducteur, la **fleur**. Celle-ci est constituée de différentes pièces florales, situées sur des cercles concentriques, les verticilles. De l'extérieur vers l'intérieur de la fleur se trouvent les pièces stériles (les sépales puis les pétales) et les pièces fertiles (les **étamines** puis le **pistil)**. Le pistil renferme les **ovules** ou **gamètes femelles,** tandis que les **étamines** contiennent les **grains de pollen** abritant les **gamètes mâles.**

Chez certaines espèces, **l'autofécondation,** c'est-à-dire la fécondation des gamètes femelles par les gamètes mâles formés tous les deux par un même individu, est obligatoire. Mais pour de nombreuses espèces, différents mécanismes **d'incompatibilité** rendent cette autofécondation impossible et obligent à une **fécondation croisée**. Celle-ci a lieu entre des gamètes mâles et des gamètes femelles provenant de deux individus différents mais d'une même espèce. La vie fixée des plantes impose alors un transport du pollen appelé **pollinisation**. Elle peut être effectuée par le **vent**, **l'eau** ou des **animaux**, comme les insectes. La pollinisation par un animal repose souvent sur une **collaboration** étroite entre la plante et son animal pollinisateur, caractérisée par des **adaptations** entre les deux espèces. Les caractéristiques de la fleur peuvent contribuer à attirer le pollinisateur, qui peut présenter des adaptations à la pollinisation. Ces adaptations mutuelles sont le résultat d'une **coévolution** entre les deux espèces.



La structure d'une graine : exemple d'une graine de haricot, dont l'un des cotylédons a été retiré.

Après la fécondation des ovules par les gamètes mâles, ces ovules fécondés se transforment en **graines**, tandis que la fleur se transforme en **fruit**. La graine, protégée par une enveloppe résistante, contient **l'embryon** (qui donnera la future plante lors de la germination), ainsi que des **réserves** qui seront utilisées lorsque cette germination aura lieu. Ces réserves, accumulées lors de la formation de la graine, sont de nature variée selon les espèces (glucidique, lipidique, ou protéique). Du fait du mode de vie des plantes, les graines issues de la reproduction sexuée sont responsables de la **dispersion de l'espèce** et de la **colonisation de nouveaux milieux**. Elles sont disséminées soit directement à partir de la plante, soit par des **agents physiques** comme le **vent** ou **l'eau,** ou encore par des **animaux**. Les graines ou les fruits présentent des dispositifs spécifiques leur permettant d'être adaptés à leur mode de dissémination. Par exemple, la présence de crochets sur les fruits favorise leur accrochage sur le corps des animaux disséminateurs, et donc leur transport. De nombreux animaux consomment des fruits charnus puis rejettent avec leurs excréments les graines dont le pouvoir germinatif est accru lors du passage dans le tube digestif animal. Ainsi, les relations entre les plantes et leurs animaux pollinisateurs ou disséminateurs s'inscrivent dans le cadre **d'interactions mutualistes** : les individus de deux espèces différentes en tirent chacun un **bénéfice**.

UN ARTICLE DU *MONDE* À CONSULTER

• Les fleurs, un parfum de mystère p. 40
(Florence Rosier, *Le Monde* daté du 02.05.2018)

ZOOM SUR…

FRUIT OU LÉGUME ?

Les haricots verts sont des légumes, mais le concombre, la tomate, la courgette sont des fruits ! Dans le langage courant est appelé « légume » tout aliment accompagnant un plat au cours d'un repas. Mais en botanique, le terme « légume » désigne uniquement la gousse formée par le fruit d'une « légumineuse », famille de plantes à laquelle appartiennent le pois, le haricot, la lentille. Ainsi de nombreux « légumes » consommés, comme les haricots verts, la tomate, la courgette sont des fruits, car ils contiennent des graines. D'autres, comme les pois et les lentilles, sont en réalité des graines.

LA COÉVOLUTION

La coévolution est définie comme l'évolution coordonnée de deux espèces en relation étroite l'une avec l'autre. Il existe une véritable collaboration entre les animaux pollinisateurs et la plante à laquelle ils sont souvent inféodés. Par exemple, certains papillons pollinisateurs présentent un organe de succion extrêmement long et effilé, qui s'adapte exactement à l'éperon nectarifère formé par le pétale de l'orchidée qu'ils pollinisent. Grâce à cet organe de succion, les papillons récoltent le nectar situé au fond de l'éperon nectarifère, et se chargent en pollen qu'ils transfèrent vers d'autres fleurs de la même espèce. Il s'agit par exemple de l'orchidée *Zaluzianskya microsiphon* en Afrique du Sud, qui est essentiellement pollinisée par la mouche *Prosoeca ganglbaueri*.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

La domestication des plantes

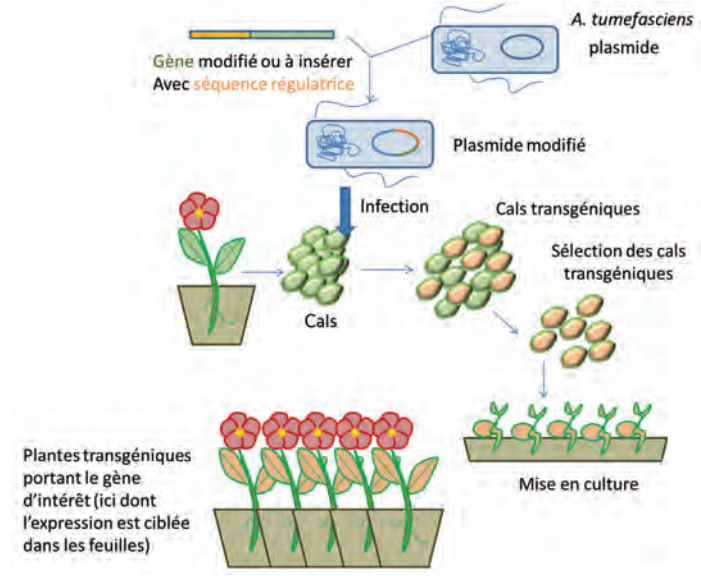
Cette partie ne sera pas évaluée à l'épreuve écrite du baccalauréat.

Depuis le Néolithique (– 12 000 à – 4 000 environ av. J.-C.), l'être humain a domestiqué des espèces végétales pour produire sa nourriture. Comment s'est effectuée la domestication des plantes ? Quelles relations se sont établies entre les populations humaines et les plantes domestiquées ? Quelles sont leurs conséquences évolutives ?

La sélection des plantes domestiquées : de la domestication initiale aux biotechnologies

La culture des plantes pour l'alimentation humaine mais aussi l'habillement, l'énergie, la médecine, etc., constitue un **enjeu majeur pour l'humanité**. Les espèces végétales actuellement cultivées sont issues d'une **domestication** d'espèces végétales initialement sauvages. Au **Néolithique**, la domestication a consisté en une **sélection artificielle** d'espèces sauvages utiles à cultiver. Puis cette sélection s'est poursuivie selon différentes modalités : sélection des caractères intéressants (sélection massale), hybridations spontanées ou provoquées entre variétés ou espèces différentes, mutations spontanées, etc. Cette sélection artificielle était **empirique** et reposait sur le contrôle génétique des caractères des plantes transmissibles à leur descendance. Une espèce était souvent soumise à une sélection variétale, générant des variétés adaptées localement. Les caractères sélectionnés (car intéressants pour la culture et l'utilisation de ces plantes) se révèlent souvent défavorables à leur culture en milieu sauvage, à cause de la perte des défenses chimiques ou des capacités de dissémination.

Depuis la fin du XIXe siècle, la **sélection moderne** et programmée a remplacé la sélection empirique. Elle utilise différentes méthodes. L'**hybridation,** qui s'effectue sur plusieurs années, crée de **nouvelles variétés**. Elle consiste en la répétition de sélections et de croisements de variétés différentes pour transférer un caractère intéressant d'une variété à une autre. L'hybridation entre deux espèces différentes peut former une **nouvelle espèce**. L'essor récent des biotechnologies permet la production de nouvelles variétés par **génie génétique**, un ensemble de techniques de modifications du génome. Parmi elles, la **transgénèse** permet d'introduire dans le génome des cellules végétales un gène d'intérêt, qui confère à la plante, appelée **« OGM »** (Organisme Génétiquement Modifié), de nouveaux caractères, tels



Cal : amas de cellules végétales non différenciées pouvant générer *in vitro* une plante.
La transgénèse permet l'obtention d'OGM.

ZOOM SUR…

UN OGM : LE MAÏS BT (1995)

Pour obtenir le maïs OGM Bt, des plasmides Ti (petites molécules circulaires d'ADN), présents naturellement dans la bactérie *Agrobacterium tumefasciens* qui infecte les végétaux, sont modifiés : le gène bactérien de virulence d'*A. tumefasciens* est remplacé par un gène de la bactérie *Bacillus thurigiensis* codant une toxine dirigée contre un insecte ravageur, la pyrale du maïs. Le plasmide Ti modifié est introduit dans des cals, des amas de cellules végétales indifférenciées de maïs obtenus *in vitro*. Seuls les cals ayant intégré le plasmique Ti sont sélectionnés et forment des plants de maïs transgéniques, capables de sécréter la toxine contre la pyrale et devenus résistants à cet insecte.

NOTIONS-CLÉS

CRISPR-CAS9

Méthode d'édition du génome au sein de cellules vivantes, mise au point en 2012. La reconnaissance de la séquence d'ADN à modifier est effectuée spécifiquement par un ARN cible. Puis la protéine CRISPR-Cas 9, une endonucléase, coupe l'ADN à proximité de la séquence ciblée. Une fois l'ADN coupé, celui-ci est réparé ou modifié par insertion d'un fragment d'ADN préalablement choisi. Le système CRISPR-Cas9 permet de modifier des séquences d'ADN de manière précise, rapide et à faible coût, ce qui constitue une véritable révolution biotechnologique.

CULTIVAR

Variété de plante cultivée présentant des caractéristiques propres, et obtenue par sélection. Actuellement, un cultivar désigne une variété stable et homogène, enregistrée dans les catalogues officiels.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

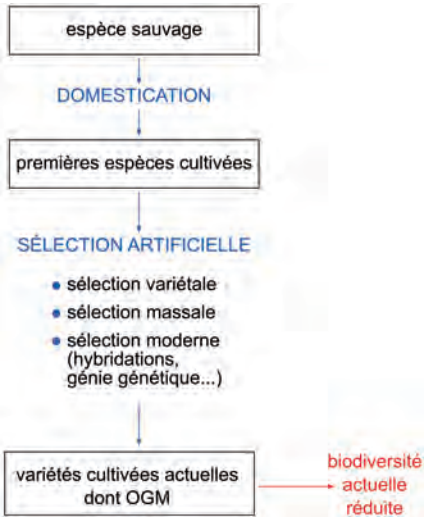
que des résistances à des parasites ou des tolérances à des herbicides. Dernièrement, **l'utilisation des outils d'édition** du génome permet d'en effectuer des modifications limitées et ciblées pour inactiver un gène ou le modifier. Ces plantes dont le génome est faiblement modifié sont qualifiées de **« nouveaux OGM »**. La création actuelle de nouvelles variétés végétales est ainsi devenue de plus en plus rapide.

La biodiversité des plantes domestiquées

Une espèce domestiquée présente souvent de nombreuses variétés. Cette **diversité génétique** ou **allélique** résulte de mutations dans des gènes particuliers. La biodiversité des plantes domestiquées a longtemps été importante, mais l'étude des génomes montre un **appauvrissement** actuel et global de cette diversité. Depuis plusieurs dizaines d'années, la culture massive d'un faible nombre de variétés parmi les plus productives entraîne une **homogénéisation génétique**, réduisant la biodiversité des plantes cultivées. Plusieurs exemples historiques, comme la famine irlandaise au XIX^{e} siècle, attestent des risques de cette faible biodiversité pour les populations humaines. Il est important de conserver des variétés végétales diversifiées peu productives, mais porteuses de caractères potentiellement intéressants dans le futur et constitutives de **ressources génétiques**. De plus, l'extension des cultures et la perte, lors de la sélection, de caractères favorables à la culture des plantes en milieu sauvage favorisent le développement des maladies infectieuses végétales. Ces **fragilités** doivent être compensées par des **pratiques culturales adaptées**, telles que la réduction de l'usage des intrants, la limitation des ravageurs par lutte biologique, etc.

Conséquences évolutives de la domestication des plantes pour les populations humaines

La sélection exercée par l'être humain sur les plantes cultivées au cours des siècles s'est donc établie au sein d'une **relation mutualiste**, dont les plantes et les êtres humains retirent chacun un bénéfice. La domestication des plantes a des conséquences importantes dans l'histoire des populations humaines, en contribuant notamment à la sélection de certains caractères humains. Par exemple, les populations humaines présentent une grande variabilité interindividuelle en ce qui concerne la quantité d'**amylase salivaire**, une enzyme hydrolysant l'amidon en maltose. Or, les individus ayant un régime riche en amidon possèdent davantage de copies du gène de l'amylase salivaire que des individus ayant un régime pauvre en amidon, ce qui explique les différences observées dans les quantités de cette enzyme. Ainsi, lorsque l'alimentation est riche en amidon, un nombre élevé de copies du gène de l'amylase salivaire conférerait un avantage sélectif, illustrant qu'une **évolution culturelle**, ici de nature agricole et alimentaire, peut être à l'origine d'une **évolution génétique** humaine. Les relations mutualistes entre les populations humaines et les plantes domestiquées se caractérisent donc par une **coévolution**, où l'espèce humaine favorise l'essor des plantes cultivées, tandis que ces plantes contribuent au développement des populations humaines.



L'évolution de la biodiversité des plantes cultivées.

DEUX ARTICLES DU *MONDE* À CONSULTER

• Même restreints, les néonicotinoïdes persistent p. 42
(Stéphane Foucart, *Le Monde* daté du 28.11.2019)

• Un tabac transgénique plus productif p. 44
(Hervé Morin, *Le Monde* daté du 09.01.2019)

ZOOM SUR…

LA PRODUCTION DE SEMENCES

La production de semences est une pratique culturale essentielle en agriculture. Une semence est une graine ou une autre partie d'un végétal destinée à être semée pour former une plante. Le choix des semences est déterminant pour l'obtention d'une récolte de qualité présentant les rendements recherchés. Il existe différents types de semences.

Les semences certifiées répondent à des obligations précises de qualité et de rendement. Elles sont commercialisées par de grands groupes (obtenteurs de semences, sociétés d'agrochimie ou de biotechnologies).

Les semences fermières (ou semences de ferme) sont des semences issues de la mise en culture de semences certifiées. L'agriculteur cultive des semences certifiées, puis utilise une partie de sa récolte pour sa culture suivante.

Les semences paysannes sont obtenues par les agriculteurs à partir de variétés non certifiées qui concernent souvent des variétés anciennes ou locales.

La production et la commercialisation des semences sont l'objet d'une réglementation précise. En France, le catalogue officiel des espèces et variétés végétales répertorie les variétés cultivées obtenues par sélection et dont les semences sont autorisées à la vente et à la culture. De très nombreux pays sont dotés de tels catalogues.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

La vie fixée chez les plantes, exercice 1

Le sujet (d'après bac S, 2016, Métropole)

Dans son ouvrage, *L'Éloge de la plante* (2004), le botaniste Francis Hallé discute des surfaces d'échanges chez les végétaux et animaux.

« Mesurer la surface d'un végétal n'est pas chose facile [...]. Quelle peut être la surface aérienne d'un arbre de 40 m de haut ? Une estimation de 10 000 m² (1 ha) n'est certainement pas exagérée ; la surface « interne » permettant les échanges gazeux serait 30 fois supérieure [...]. En ce qui concerne les surfaces racinaires, les investigations sont encore plus difficiles et les données encore plus rares : la surface souterraine d'un plant de seigle serait 130 fois plus grande que la surface aérienne. »

Exposez en quoi les structures des organes impliqués dans les échanges nutritifs externes et internes d'une plante sont adaptées à son mode de vie fixé.

Vous rédigerez un texte argumenté. On attend que l'exposé soit étayé par des expériences, des observations, des exemples, etc.

LA BONNE MÉTHODE

Construire et rédiger une introduction

Les réponses aux exercices 1 et 2 doivent généralement contenir une introduction. L'introduction est la première partie de la réponse lue par l'évaluateur : il est donc important qu'elle soit réussie. L'objectif de l'introduction est de présenter précisément le problème scientifique et d'annoncer la structure de la réponse apportée. Ainsi, l'introduction se décompose en 3 parties. La première partie est la présentation du sujet, en partant généralement d'un thème un peu plus large dans lequel s'inscrit le sujet étudié, ou en proposant une accroche, c'est-à-dire une entrée en matière intéressante. Il peut être judicieux de définir certains termes du sujet, et il est fortement déconseillé de recopier le début de l'énoncé. Cette première partie conduit de manière logique à la deuxième, qui est la présentation du problème scientifique à traiter. Il est possible de reprendre à l'identique le problème posé dans l'énoncé, en le formulant à l'aide d'une question directe ou indirecte. Enfin, la troisième partie annonce le plan de la réponse, c'est-à-dire les grandes étapes qui seront abordées pour répondre au problème. En aucun cas, l'introduction ne doit répondre au problème posé puisque son objectif est de susciter l'intérêt de l'évaluateur et de lui permettre de vérifier que le problème posé est compris et bien délimité. Dans l'exercice 2, l'annonce du plan doit insister sur la démarche choisie pour résoudre le problème scientifique.

Utiliser d'autres formes de communication que le texte

Dans les réponses aux exercices 1 et 2, il est possible d'intégrer, soit parce que l'énoncé l'exige, soit au libre choix du candidat, des schémas, des tableaux, des graphiques, etc., c'est-à-dire toute forme de communication jugée nécessaire. L'essentiel est que les règles de communication spécifiques de chaque forme soient respectées (titre, légende, tracé des tableaux, etc.). Ces figures doivent être grandes, bien organisées et facilement lisibles. Elles doivent apporter un plus dans la compréhension du sujet par rapport à un texte seul. Ces figures sont à intégrer dans le développement et un schéma-bilan peut être placé à la fin du développement avant la conclusion.

Faire un schéma fonctionnel

Un schéma fonctionnel vise à représenter de manière schématique les relations entre différents éléments pour expliquer le fonctionnement d'un système ou les différentes étapes de l'évolution d'un système au cours du temps. Après avoir identifié les différents éléments, il faut représenter par des flèches les relations entre ces éléments, si besoin en précisant la nature de ces relations (activation, inhibition, relation temporelle, etc.). La réalisation d'un schéma fonctionnel nécessite de faire des choix sur les éléments et les relations que l'on désire représenter. Ce schéma offre une vision synthétique et rigoureuse du sujet étudié : il doit être clair et facilement lisible par l'évaluateur.

CE QU'IL NE FAUT PAS FAIRE

Oublier d'intégrer une observation ou une expérience.

Le corrigé

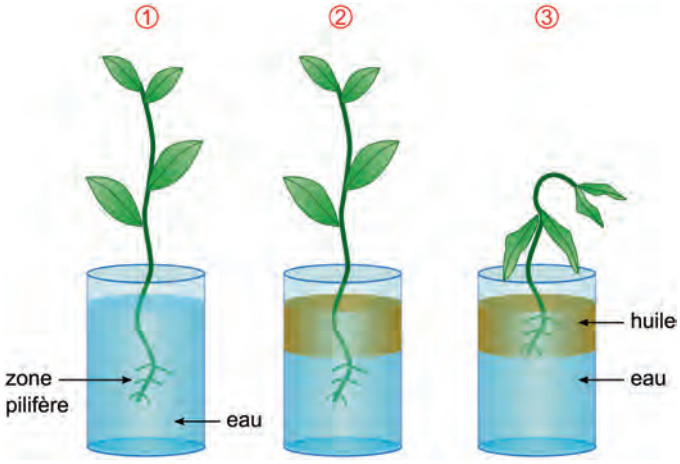
La majorité des animaux sont capables de se déplacer dans leur milieu pour rechercher leur nourriture, échapper à leurs prédateurs et se reproduire. À l'inverse, les plantes se caractérisent par un mode de vie fixé à l'interface sol/atmosphère, rendant impossible tout déplacement. Les feuilles des plantes sont responsables des échanges avec l'atmosphère, tandis que les racines participent aux échanges avec le sol. Comment les structures des organes impliqués dans les échanges nutritifs externes et internes de la plante sont-elles adaptées à son mode de vie fixé ? Nous présenterons d'abord comment les racines assurent les échanges nutritifs externes avec le sol, puis comment les feuilles réalisent les échanges nutritifs externes avec l'atmosphère, et enfin nous étudierons comment les vaisseaux conducteurs assurent les échanges nutritifs internes de la plante.

I. Les racines assurent les échanges nutritifs externes avec le sol

La plante immobile n'est pas capable de se déplacer pour chercher ses éléments nutritifs (eau, CO_2, ions minéraux) présents dans le milieu extérieur. Or, la plante a besoin de ces molécules pour réaliser la photosynthèse qui permet, en présence de lumière, la production des molécules organiques nécessaires à la vie de la plante. La plante développe donc de vastes surfaces d'échanges au niveau d'organes souterrains, les racines, afin d'absorber l'eau et les ions minéraux contenus dans le sol. La zone d'absorption de l'eau au niveau des racines peut être mise en évidence par des expériences présentées dans le schéma suivant.

Trois plants similaires sont placés dans différentes conditions de culture. La racine entière du premier plant, y compris la

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.



Mise en évidence de la zone d'absorption de l'eau au niveau des racines.

zone pilifère avec les poils absorbants, est placée dans l'eau. Pour le second plant, la partie inférieure de la racine avec la zone pilifère est immergée dans l'eau tandis que la partie supérieure est placée dans l'huile. Pour le troisième plant, l'extrémité de la racine dépourvue de poils baigne dans l'eau, alors que la zone pilifère est dans l'huile. Seuls les premier et second plants se développent. Le contact de la zone pilifère avec l'eau est donc indispensable à la vie de la plante. Les poils absorbants sont en effet le lieu de l'absorption racinaire de l'eau mais aussi des sels minéraux du sol. Ainsi, les racines assurent l'ancrage de la plante dans le sol et absorbent l'eau et les ions minéraux qui y sont présents. Or, la photosynthèse, qui a lieu dans les feuilles chlorophylliennes, nécessite également du CO_2 atmosphérique. Comment s'effectuent les échanges gazeux de la plante avec l'atmosphère ?

II. Les feuilles assurent les échanges nutritifs externes avec l'atmosphère

Les feuilles aériennes sont le lieu des échanges gazeux avec l'atmosphère. Les feuilles sont recouvertes d'une cuticule, imperméable sauf au niveau des stomates, structures situées sur la face inférieure de la feuille et spécialisées dans les échanges gazeux entre la plante et l'atmosphère. La journée, au niveau des stomates, le CO_2 atmosphérique pénètre dans la feuille et est utilisé lors la photosynthèse dans les cellules photosynthétiques foliaires. L'O_2 produit lors de la photosynthèse et l'eau présente au niveau des feuilles sortent par les stomates dans l'atmosphère. L'orifice des stomates, appelé ostiole, peut être ouvert ou fermé selon les conditions du milieu, évitant ainsi une perte d'eau en cas de fort ensoleillement. Les feuilles développent donc de vastes surfaces, d'échanges avec l'atmosphère ou de captage de l'énergie lumineuse. Ainsi, les racines souterraines permettent l'absorption des ions minéraux et de l'eau du sol, qui doivent être transférés aux feuilles aériennes photosynthétiques. Cette photosynthèse produit des molécules organiques distribuées dans l'ensemble de la plante. Comment s'effectuent les transferts nutritifs à l'intérieur de la plante ?

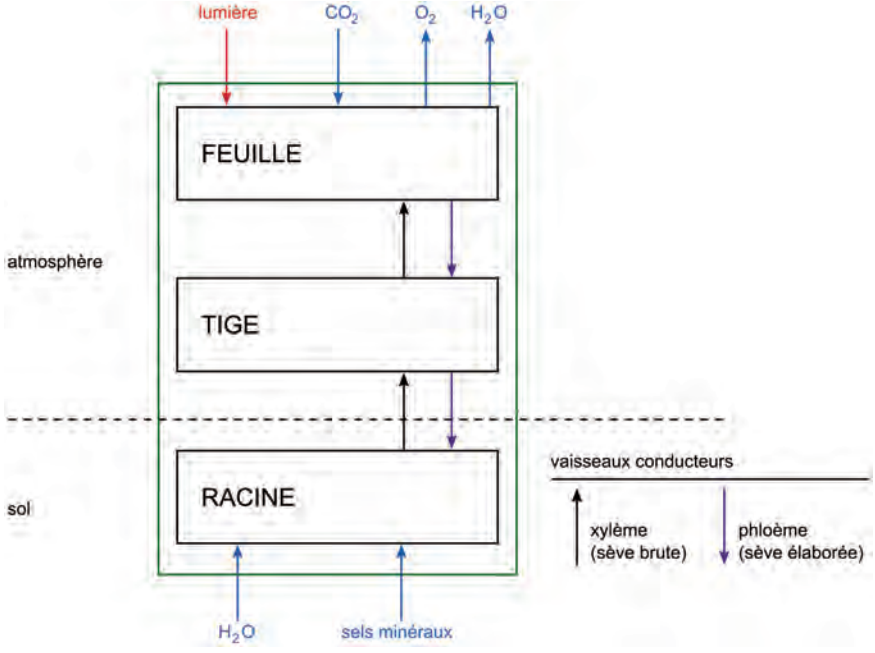


Schéma-bilan : Les échanges nutritifs externes et internes de la plante.

III. Les vaisseaux conducteurs assurent les échanges nutritifs internes

Les transferts nutritifs de la plante s'effectuent par deux réseaux distincts de vaisseaux conducteurs : le xylème et le phloème. Le xylème transporte la sève brute composée d'eau et d'ions minéraux, des racines vers le reste de la plante, notamment vers les feuilles réalisant la photosynthèse. Le phloème transporte la sève élaborée riche en glucides synthétisés dans les feuilles lors de la photosynthèse vers les autres organes consommateurs de la plante.

Ainsi, le mode de vie fixé des plantes à l'interface sol/atmosphère entraîne des contraintes concernant leur organisation fonctionnelle pour la réalisation de leur nutrition. Les plantes présentent de vastes surfaces d'échanges avec le sol au niveau des racines souterraines pourvues de poils absorbants, et avec l'atmosphère au niveau des stomates des feuilles aériennes. La vie fixée des plantes exerce des contraintes sur d'autres domaines de la vie de la plante. En effet, comment les plantes assurent-elles leur reproduction sexuée, en particulier la rencontre des gamètes, alors qu'elles sont fixées ?

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

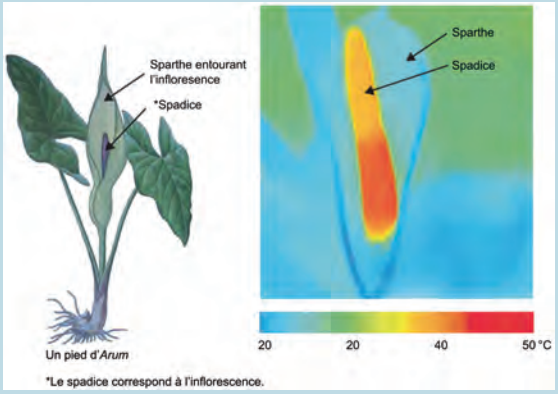
Chaleur chez l'arum, exercice 1

Le sujet

L'inflorescence d'arum présente une particularité remarquable. Lorsque les fleurs mâles produisent du pollen, une brutale élévation de température se produit dans l'inflorescence, provoquant l'émission de substances volatiles qui attirent les insectes pollinisateurs.

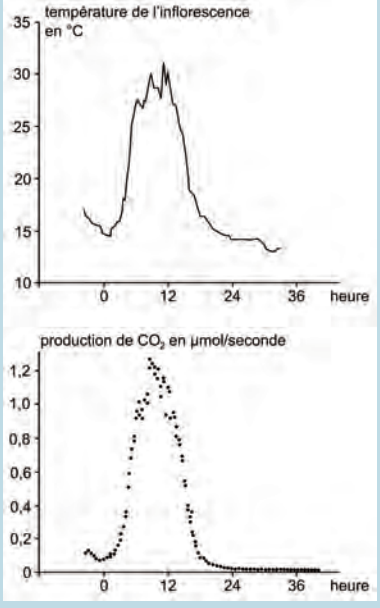
Identifiez et décrivez le mécanisme expliquant la brutale production de chaleur chez l'arum. Vous organiserez votre réponse selon la démarche de votre choix à condition qu'elle intègre des données des documents et les connaissances utiles.

Document 1 — Température mesurée au niveau de l'inflorescence d'arum lors du brutal épisode de production de chaleur.



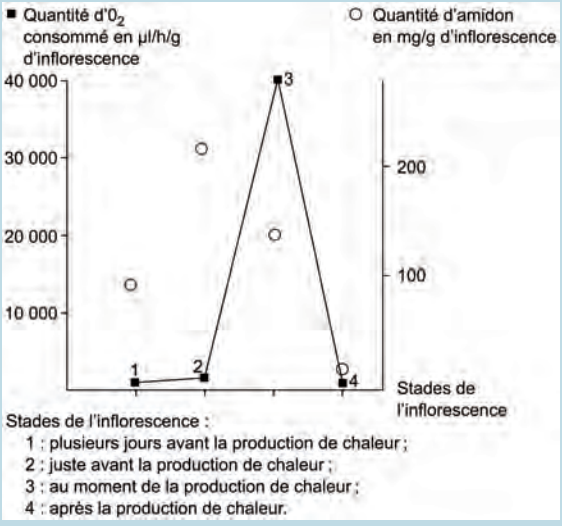
*Le spadice correspond à l'inflorescence.
D'après Seymour et Ito, 2010.

Document 2 — Mesure de la température et de la production de CO_2 dans l'inflorescence au cours de la journée.



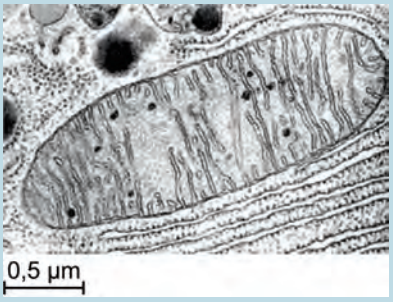
D'après Lance, Signol et Chauveau, 1976.

Document 3 — Mesures de la quantité de dioxygène consommé et de la quantité de réserves d'amidon dans l'inflorescence à différents stades.



D'après Lance, Signol et Chauveau, 1976, modifié.

Document 4 — Mesure de la quantité de l'organite photographié ci-dessous dans le spadice.



D'après Banque d'images SVT Dijon.

	Plusieurs jours avant la production de chaleur	Juste avant la production de chaleur	Au moment de la production de chaleur	Après la production de chaleur
Abondance relative de l'organite photographié ci-dessus	+	++++	++++	+

CE QU'IL NE FAUT PAS FAIRE

Réciter le cours sur la respiration au lieu d'exploiter les documents.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Le corrigé

Les fleurs, organes de la reproduction sexuée chez les Angiospermes, présentent une grande diversité. Chez les arums, les fleurs mâles sont caractérisées par une brusque élévation de la température, entraînant l'émission de molécules volatiles attirant les insectes pollinisateurs. Quel est le mécanisme expliquant la brutale production de chaleur dans l'inflorescence de l'arum ? Pour répondre à cette problématique, nous analyserons, au cours des différents stades de l'évolution de l'inflorescence, l'évolution de la température, de la production de CO_2, de la consommation d'O_2, des réserves d'amidon et de la quantité en un organite intracellulaire présent dans l'inflorescence que nous identifierons.

Le document 1 montre qu'un pied d'arum présente une spathe entourant le spadice, qui constitue l'inflorescence mâle. Lors d'un brusque épisode de production de chaleur, la température des tissus de la spathe est environ 20 °C, alors que la température du spadice est plus forte, environ 35 °C dans sa partie supérieure, et jusqu'à 40 °C dans sa partie inférieure. Le document 2 confirme cette élévation de la température dans le spadice et met en évidence sa rapidité : à 3 heures, la température est 15 °C, puis elle double pour atteindre sa valeur maximale de 30 °C dès 6 heures. La température se maintient à cette valeur maximale jusqu'à 15 heures, puis elle diminue et rejoint sa valeur initiale de 15 °C à 18 heures. La mise en relation des documents 1 et 2 montre une élévation rapide et importante (en 3 heures et de 15 °C) de la température du spadice. La température reste élevée pendant une douzaine d'heures avant de chuter.

Le document 2 montre que la production de CO_2 dans l'inflorescence augmente à partir de 3 heures et atteint sa valeur maximale à 12 heures (1,2 µmol/s) avant de revenir vers 18 heures à sa valeur initiale (0,2 µmol/s). La comparaison des courbes de température et de production de CO_2 montre que ces deux paramètres évoluent de manière parallèle : la température et la production de CO_2 sont étroitement corrélées dans le temps.

L'étude du document 3 montre qu'avant la production de chaleur, la quantité d'amidon augmente dans l'inflorescence (passant de 100 mg/g au stade 1 de l'inflorescence à 200 mg/g au stade 2), alors que la consommation d'O_2 reste faible. Au moment de la production de chaleur, la quantité d'amidon présent dans l'inflorescence diminue de 200 mg/g à 120 mg/g, tandis que la consommation d'O_2 augmente fortement pour atteindre 40 000 µl/h/g, puis redevient très faible après la production de chaleur. Ainsi, la production de chaleur dans l'inflorescence de l'arum est associée à une forte production de CO_2, une consommation accrue d'O_2 et une diminution des réserves en amidon. Or, l'amidon (polymère de glucose) constitue la forme de réserve du glucose chez les végétaux. De plus, les cellules végétales sont capables de réaliser la respiration, qui consiste en l'oxydation du glucose en présence d'O_2, associée à une production de CO_2. Nous pouvons donc en déduire que les cellules constituant l'inflorescence de l'arum réalisent une respiration accrue, à l'origine de la brusque production de chaleur observée.

Enfin, le document 4 présente, lors de l'évolution de l'inflorescence, la variation dans le spadice de la quantité d'un organite photographié. Cet organite possède une membrane interne développée, munie de crêtes caractéristiques d'une mitochondrie. Les mitochondries sont rares dans le spadice plusieurs jours avant et après la production de chaleur, mais elles sont abondantes juste avant et pendant. Or, les mitochondries sont les organites spécialisés dans la respiration cellulaire. La forte quantité de mitochondries présentes juste avant et pendant la production de chaleur confirme que cette production de chaleur est réalisée par une respiration intense dans les nombreuses mitochondries du spadice. On peut supposer que l'énergie produite lors de la respiration dans le spadice de l'arum est de l'énergie thermique, à l'origine de l'augmentation de la température.

Ainsi, nous avons établi que la forte production de chaleur dans l'inflorescence de l'arum est due à une forte activité respiratoire dans les mitochondries des cellules de l'inflorescence. Cette respiration accrue consomme du glucose issu de l'hydrolyse de l'amidon, de l'O_2, et produit du CO_2 et une forte énergie thermique. Il faudrait maintenant préciser l'étude des mécanismes moléculaires ayant lieu dans la mitochondrie qui sont responsables de cette forte production de chaleur.

LA BONNE MÉTHODE

Lire et exploiter des grandeurs chiffrées

De nombreux documents proposent des grandeurs chiffrées, qui doivent être utilisées pour appuyer votre raisonnement. Mais il est généralement impossible de citer toutes les valeurs fournies. Il faut choisir judicieusement les valeurs les plus significatives, en relation avec les éléments à démontrer. Il faut souvent penser à comparer une valeur donnée à une valeur résultant d'un témoin, pour mettre en évidence le phénomène étudié. Chaque valeur doit être clairement nommée et accompagnée de son unité. La lecture de certaines valeurs sur les échelles des graphiques est parfois délicate. Cela ne doit pas vous déstabiliser : utilisez l'échelle fournie pour proposer une valeur approchée.

Lire des graphiques avec des barres d'erreur

Certains graphiques présentent une estimation de la grandeur étudiée accompagnée de barres d'erreur qui indiquent l'incertitude de l'estimation. La valeur de la grandeur mesurée se situe dans l'intervalle indiqué par les barres d'erreur. Il est alors important de préciser l'estimation de la grandeur et l'intervalle correspondant aux barres d'erreur (exemple : température T = 35 °C ± 1 °C signifie que T est compris entre 34 et 36 °C). Attention, lors de la comparaison de deux grandeurs : elles ne sont significativement différentes que si les deux intervalles correspondants ne se recoupent pas. Si les deux intervalles se chevauchent, alors les deux grandeurs ne sont pas significativement différentes.

Rédiger une analyse de courbes

De nombreux documents sont des graphiques présentant une ou plusieurs courbes. Pour bien analyser une courbe, il faut d'abord se repérer dans le graphique en identifiant la grandeur présente sur l'axe des abscisses et celle présente sur l'axe des ordonnées, ainsi que les unités employées. Le titre du graphique et les légendes associées apportent également des informations importantes. Après avoir identifié le(s) phénomène(s) mis en évidence par le graphique, il s'agit de rédiger l'analyse de la courbe afin que celle-ci soit au service à votre raisonnement. Il est souvent inutile de rédiger une analyse complète, car il faut faire la différence entre les variations significatives à exploiter et celles moins pertinentes. La rédaction de l'analyse d'une courbe est parfois difficile. Évitez impérativement les expressions « La courbe monte », « La courbe descend », mais décrivez l'évolution de la grandeur étudiée (sur l'axe des ordonnées) en fonction de la grandeur de l'axe des abscisses, en caractérisant les points remarquables de la courbe (maximums, minimums, etc.). Pour cela, utilisez les verbes appropriés : augmenter, diminuer, stagner, rester constante, doubler, diminuer de moitié, etc. La description de cette évolution doit s'accompagner de valeurs judicieusement choisies des grandeurs étudiées, sans omettre les unités.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Les fleurs, un parfum de mystère

Tardivement apparues dans l'histoire évolutive, les plantes à fleurs ont conquis la planète en un temps record. Retour sur un prodigieux succès, qui nous conduit à voir d'un autre œil ces « fausses ingénues »

L'émerveillement renaît chaque année, quand la nature se revêt de vert tendre et se pare de fleurs. Et le printemps réveille ces questions : comment naissent les fleurs ? D'où viennent les forces obscures à l'œuvre dans la sève, lorsque les jours rallongent ? La science des fleurs bénéficie d'un bouquet de découvertes récentes. *« C'est un domaine très dynamique »*, se réjouit François Parcy, expert en biologie végétale dans une équipe CNRS-INRA-CEA, à l'université Grenoble-Alpes.

Les fleurs, fragiles objets pour doux rêveurs ? Détrompez-vous. Ce sont de redoutables séductrices – c'est même leur mission. Si les plantes exhibent ces parures, c'est bien pour attirer insectes et autres pollinisateurs qui favorisent leur reproduction et leur dissémination. Les faits sont là : sous leur air enjôleur, ces fausses ingénues ont si bien servi l'intérêt des « plantes à fleurs » que celles-ci dominent aujourd'hui à plus de 90 % le monde végétal. Sans doute ont-elles ainsi favorisé la survie et l'expansion de notre espèce. *« Tous nos aliments d'origine végétale – fruits, légumes, graines – proviennent des plantes à fleurs »*, souligne François Parcy.

Grâce et pesanteur du pouvoir des fleurs, quand elles déplient leurs corolles et déploient leurs couleurs ! *« La plupart* [des fleurs] *ont recours à des ruses, à des combinaisons, à une machinerie, à des pièges, qui, sous le rapport de la mécanique, de la balistique, de l'aviation, de l'observation des insectes, par exemple, précédèrent souvent les inventions et les connaissances de l'homme »*, écrivait l'écrivain belge Maurice Maeterlinck (1862-1949), Prix Nobel de littérature, dans son ouvrage *L'Intelligence des fleurs*, publié en 1907.

« Ruses », « inventions », « intelligence » des plantes à fleurs ? Disons-le tout net : c'est de l'anthropomorphisme assumé. *« Il faut être prudent avec le terme "intelligence"*, soupire Charlie Scutt, du CNRS à l'ENS-Lyon. *C'est l'évolution, en réalité, qui a peaufiné des systèmes biologiques, en réponse à des problèmes précis. La plante n'est pas consciente de l'insecte qui la pollinise, par exemple. Parlerait-on de "l'intelligence" d'un système de régulation du glucose dans le sang, chez l'animal ? »*

Revenons à la naissance des fleurs. La question est double. Comment les fleurs sont-elles apparues au cours de l'évolution ? Et comment se développent-elles sur la tige ?

Pour Darwin, la première question était un *« abominable mystère »*. Pour le comprendre, il faut remonter aux premières plantes terrestres : des mousses, apparues il y a 450 millions d'années. Ensuite sont venues les fougères, il y a 420 millions d'années. Puis une rupture a lieu, il y a 350 millions d'années : l'ère des « plantes à graines » a sonné. Ces plantes ont inventé un mode de reproduction qui produit des graines, indépendamment du milieu aqueux. *« Cette super-innovation leur a permis de résister à la sécheresse et au froid »*, relève François Parcy. La pollinisation se fait par le vent. Ces plantes sont nommées « gymnospermes » – du grec *sperma* « graines » et *gymno* « nu ».

La plupart des gymnospermes actuels sont des conifères : sapins, pins, mélèzes, cyprès… Elles disposent de « cônes » tantôt mâles, tantôt femelles. La pomme de pin est l'exemple type d'un cône femelle ; les ovules y sont logés à la base des écailles, disposées en spirales.

Ensuite se produit le « saut évolutif » qui fascinera Darwin. *« Un beau jour, des plantes ont inventé un objet extraordinaire : la fleur. »* C'était il y a plus de 140 millions d'années, à la fin du jurassique ou au début du crétacé – mais cette date prête encore à débat. À cette époque, la Terre est dominée par les dinosaures. Les insectes sont déjà là. Les oiseaux apparaissent. Rares sont encore les mammifères – et guère plus gros qu'une souris. L'air est chargé en gaz carbonique, dont le taux va bientôt diminuer.

Ce fut une vraie rupture, car l'architecture des fleurs différait radicalement de celle des cônes. *« Une fleur possède quatre couronnes d'organes. Ce sont, de la périphérie vers le centre : les sépales, les pétales, les étamines et le carpelle (ou pistil) »*, résume François Parcy. Sépales et pétales jouent un rôle protecteur et attracteur d'insectes. L'étamine est l'organe mâle qui porte le pollen. Le pistil est l'organe femelle qui enferme les ovules. D'où le nom scientifique des plantes à fleurs : des « angiospermes », du grec *sperma* « graines » et *angeion*, « récipient ».

« L'abominable mystère », en réalité, est une triple énigme. Comment les plantes à fleurs sont-elles si soudainement apparues ? Deux cents millions d'années se seraient écoulées entre l'apparition des gymnospermes et celle des angiospermes : que s'est-il passé durant ce long tunnel ? *« On n'a pas trouvé d'intermédiaires entre les gymnospermes et les angiospermes, ni dans les fossiles ni dans les plantes vivantes »*, s'étonne François Parcy. Ensuite, comment les plantes à fleurs se sont-elles si rapidement diversifiées ? Enfin, comment expliquer leur succès évolutif ? Les angiospermes regroupent aujourd'hui 300 000 à 350 000 espèces. Ecrasante domination ! Seuls les milieux les plus froids échappent à leur emprise. En comparaison, les gymnospermes ne comptent que 800 à 1 000 espèces.

Nénuphar blanc

Une série de travaux récents éclaire ce mystère – sans le résoudre pourtant.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

En août 2017, une étude publiée dans la revue *Nature Communications* a fait grand bruit. Elle dressait le portrait-robot de la toute première plante à fleurs. Des équipes de 13 pays, coordonnées par Hervé Sauquet, alors au CNRS à l'université Paris-Sud, ont comparé les traits morphologiques des plus anciennes fleurs actuelles (nénuphar, magnolia, lys…). Résultat : cette fleur ancestrale, hermaphrodite (comme la plupart des fleurs actuelles), aurait présenté plusieurs cercles concentriques d'organes ressemblant à des pétales, organisés par groupes de trois ; au centre, les pistils auraient été disposés en spirale. Son dessin évoque une sorte de nénuphar blanc.

Un peu plus tôt, en mars 2017, était paru le portrait du génome du plus récent ancêtre commun des plantes à fleurs. Un travail publié dans *Nature Genetics* par l'équipe de Jérôme Salse (Inra-CNRS, université de Clermont-Ferrand). Les chercheurs ont comparé les génomes de diverses plantes à fleurs actuelles. Selon leur travail, les premières plantes à fleurs seraient apparues bien plus tôt que prévu, il y a 214 millions d'années.

« La validité de cette date reste débattue. Il n'empêche : ce fut un premier coup de pied dans la fourmilière », commente François Parcy. D'autant que, en février, une étude anglaise est venue renforcer le doute. *« Selon cette étude, les plantes à fleurs seraient apparues dans une très large fourchette de temps, comprise entre - 256 et –149 millions d'années »*, résume Charlie Scutt.

Là encore, cette analyse ne fait pas l'unanimité. *« Pour moi*, estime Charlie Scutt, *le dernier ancêtre commun des plantes à fleurs vivantes date d'il y a 160 millions d'années. C'est cohérent avec ce que l'on sait des plus anciens pollens d'angiospermes, découverts en Israël, au Maroc, au Royaume-Uni : ils datent d'il y a 141 millions d'années. »*

À quoi attribuer le fabuleux succès des plantes à fleurs ? Leur bisexualité, bien sûr, a été un puissant moteur. La fleur rassemble, sur une même structure, les organes mâles et femelles, très proches. *« C'est une invention géniale pour faciliter la reproduction*, s'enthousiasme François Parcy. *Elle a permis les interactions de ces plantes avec les insectes pollinisateurs. »*

Angiospermes et gymnospermes

Des facteurs génétiques ont sans doute aussi joué. Les premiers angiospermes possédaient des génomes de taille réduite (aujourd'hui, ils ont des génomes de toutes tailles). Leur succès évolutif serait lié à ce petit génome. C'est du moins l'hypothèse de deux auteurs américains, qui ont publié leurs réflexions dans *Plos Biology* le 11 janvier. Les gymnospermes, eux, étaient dotés de très grands génomes. Un petit génome aurait accru l'efficacité de la photosynthèse en diminuant la taille des cellules. Le transport du gaz carbonique aurait été plus efficace : ces plantes auraient mieux supporté la baisse du taux de gaz carbonique dans l'atmosphère.

En outre, les angiospermes ont acquis de nombreux gènes en double exemplaire : *« Une chance énorme, au plan évolutif »*, estime François Parcy. Car l'une des deux copies d'un gène pouvait assurer les fonctions vitales des cellules, tandis que l'autre était libre d'évoluer, d'innover, d'inventer de nouvelles structures ou fonctions…

Et enfin, il aurait permis un cycle de vie plus rapide : *« Les premiers angiospermes auraient ainsi mieux résisté à la prédation des dinosaures herbivores »*, rapporte Charlie Scutt.

Vous fatiguez ? Ecoutez ceci : *« L'heure magnifique appartient aux roses de mai. Alors, à perte de vue, du penchant des coteaux aux creux des plaines, entre des digues de vignes et d'oliviers, elles coulent de toutes parts comme un fleuve de pétales d'où émergent les maisons et les arbres, un fleuve de la couleur que nous donnons à la jeunesse, à la santé et à la joie »*, écrit Maurice Maeterlinck.

Comment cette *« heure magnifique »* est-elle possible ? Autrement dit, comment naît une fleur sur sa tige ? Fin de la parenthèse poétique. La fleur se forme à partir de cellules souches groupées dans un réservoir, le « méristème ». La floraison découle d'un cocktail de signaux lumineux, génétiques, épigénétiques, hormonaux et mécaniques.

Sur le plan génétique, la formation des organes floraux obéit à un modèle simple : le « modèle ABC ». Il figure désormais dans tous les manuels de SVT de terminale. Décrit en 1988, il dérive d'études menées chez des mutants d'Arabidopis thaliana et de la gueule-de-loup.

Ce modèle fait intervenir trois gènes bâtisseurs de fleurs, les gènes A, B et C. C'est leur combinaison, dans les cellules du bourgeon floral, qui détermine l'identité des organes floraux. Les sépales se forment quand seul le gène A s'exprime. Le pistil, quand seul le gène C s'exprime. Les pétales, quand A et B sont coexprimés. Et l'étamine, quand ce sont C et B.

« Cascade hiérarchique de gènes »

« Un beau jour, un gène-architecte nommé "leafy" ["feuillu"] *s'active. Il déclenche la formation du bourgeon floral. Comment ? En orchestrant une cascade hiérarchique de gènes [via les gènes A, B, C], dans un ordre chronologique précis »*, raconte François Parcy. Et la fleur éclôt au sommet de sa tige, petit miracle de grâce.

Bouclons maintenant la boucle : comment cette cascade est-elle apparue, au cours de l'histoire des plantes ? L'équipe de François Parcy s'est intéressée à une bizarrerie de la nature : Welwitschia mirabilis. Cet E.T. végétal, une plante informe qui peut vivre deux mille ans, et pousse dans les déserts de Namibie et d'Angola. Comme tous les gymnospermes, elle possède des cônes mâles et femelles séparés. Mais ses cônes mâles possèdent quelques ovules stériles, *« comme si cette plante avait fait une tentative avortée d'inventer une fleur bisexuelle »*, s'amuse François Parcy. Il a montré que ce gymnosperme possède un équipement génétique similaire à celui qui dirige la formation des fleurs, organisé selon la même hiérarchie. *« L'abominable mystère de Darwin n'était peut-être pas si abominable ! Les gymnospermes étaient déjà outillés pour produire une partie de ce qui deviendra la fleur chez leurs descendants »*, relève le chercheur. Comme souvent, la nature aurait recyclé, produisant du neuf avec du vieux.

À l'Institut Weizmann, en Israël, l'équipe d'Avraham Levy creuse une autre question : comment les plantes à fleurs réparent-elles une cassure de l'ADN ? Vous trouvez cela sans rapport avec les fleurs ? Eh bien non. Car pour répondre, les chercheurs ont fait « blanchir » des fleurs de tomate, habituellement

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

jaunes. Ils ont utilisé le « couteau suisse à ADN », le fameux Crispr-Cas9, pour créer une cassure dans un gène de la tomate. *« Les cellules végétales ont pu réparer ces cassures en se calquant sur le chromosome homologue »*, indique le chercheur.

« Pour moi, ces ciseaux moléculaires seraient l'outil idéal pour l'amélioration des fleurs, estime Avraham Levy. *Ils pourraient permettre de manipuler à loisir, de façon propre, les voies de leurs pigments ou de leurs parfums. »* De quoi relancer une vive controverse, de part et d'autre de l'Atlantique.

Car les plantes obtenues à partir de Crispr-Cas9 sont-elles, oui ou non, des OGM ? Non, ont tranché les Etats-Unis, le Canada et Israël. Oui, a jugé en janvier le procureur de la Cour de justice de l'Union européenne. *« Les Etats-Unis et Israël considèrent le résultat final obtenu : en principe, rien ne distingue les mutations produites pas ces nouvelles techniques d'édition des génomes des mutations qui ont lieu dans la nature. Il n'y a pas d'ADN étranger inséré »*, explique Avraham Levy. Mais les Européens, eux, considèrent le procédé, qui est une transgenèse.

Un dernier mot sur la *« reine des fleurs »*, selon Mohammed Bendahmane, de l'ENS de Lyon. Depuis près de dix ans, ce chercheur s'attache à produire une séquence de qualité du génome du rosier – un challenge, au vu de sa complexité. Il touche au but. Les enjeux sont énormes : la rose est *« la fleur la plus vendue au monde »*. Son objectif : identifier très finement les rouages moléculaires de la floraison du rosier, les voies métaboliques de ses parfums et de ses couleurs… On pourra alors, espère le chercheur, *« mieux sélectionner les traits recherchés »*, sans même recourir à une manipulation génétique.

Florence Rosier, *Le Monde*
daté du 02.05.2018

POURQUOI CET ARTICLE ?

Cet article présente le succès évolutif majeur dans le monde végétal que constitue la fleur chez les Angiospermes. Dans notre vie quotidienne, nous profitons des attraits des fleurs sans toujours penser que leurs caractéristiques si appréciées sont le résultat d'une longue évolution. Les plantes à fleurs sont des êtres vivants fixés incapables de se déplacer pour rencontrer leur partenaire sexuel lors de la reproduction. La fleur, notamment en attirant les pollinisateurs, permet la reproduction des plantes. **Cet article fait un point complet sur l'organisation de la fleur et sur le contrôle génétique de cette organisation.** Cet article présente également les interrogations concernant l'histoire évolutive de la fleur, apparue il y a plus de 150 millions d'années, ainsi que son immense succès évolutif.

Même restreints, les néonicotinoïdes persistent

Une étude montre la rémanence de ces pesticides, y compris sur des cultures non traitées et dont ils ont été bannis

L'effet délétère des pesticides « tueurs d'abeilles » ne cessera pas avec leur retrait du marché. Les désormais fameux néonicotinoïdes persistent en effet dans l'environnement et imprègnent des cultures non traitées, plusieurs années après avoir été interdits, à des niveaux demeurant dangereux pour les abeilles et les pollinisateurs sauvages – parfois à des concentrations plusieurs dizaines de fois supérieures à celles de cultures traitées. Ce sont les conclusions saillantes d'une étude française à paraître jeudi 28 novembre dans la revue *Science of the Total Environment*.

Des résultats qui s'inscrivent dans la lignée de publications montrant la dispersion et la persistance dans l'environnement des « néonics », et qui prennent toute leur importance à la lumière des récents travaux indiquant un effondrement accéléré des populations d'insectes dans les campagnes des pays du Nord.

Les auteurs, conduits par Dimitry Wintermantel (INRA, CNRS) et Vincent Bretagnolle (CNRS), chercheurs au Centre d'études biologiques de Chizé (CNRS, université de La Rochelle), ont analysé du nectar et du pollen prélevés sur quelque 300 parcelles de colza, réparties sur la zone atelier Plaine et Val de Sèvre, une plaine céréalière de 450 km² utilisée à des fins de recherche sur les liens entre pratiques agricoles et écosystèmes.

Plusieurs centaines d'échantillons ont été prélevés sur ces champs entre 2014 et 2018, c'est-à-dire après la mise en place du moratoire de 2013 interdisant l'utilisation des trois principales molécules (imidaclopride, thiaméthoxame, clothianidine) sur les cultures visitées par l'abeille, comme le colza, le tournesol ou encore le maïs.

Résultat : malgré ces interdictions d'usage, les chercheurs retrouvent des traces de « néonics » dans 43 % des échantillons de colza analysés, l'imidaclopride étant de loin la substance la plus fréquente. Plus étonnant, aucune tendance à la baisse n'est observée. En 2014, on retrouvait de l'imidaclopride dans environ 70 % des parcelles, ce taux chutant à seulement 5 % l'année suivante, pour remonter à plus de 90 % en 2016, descendre à 30 % en 2017 pour remonter encore, cette fois autour de 55 % en 2018.

Dans leur grande majorité, les taux de contamination des pollens et nectars testés sont inférieurs à 1 partie par milliard (ppb). Mais les concentrations peuvent aussi être spectaculaires. En 2016, en deux occasions, les chercheurs ont trouvé plus de 45 ppb d'imidaclopride dans les échantillons testés. Plus de cinq fois la concentration de produit

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

attendue dans le nectar ou le pollen de colza traité.

Le risque est-il réel ? Les auteurs répondent par l'affirmative. Après avoir utilisé un modèle simulant le risque de mortalité pour trois types d'abeilles (domestiques, bourdons et abeilles solitaires), ils estiment qu'au cours des deux pires années – 2014 et 2016 –, 12 % des parcelles étaient assez contaminées pour tuer 50 % des abeilles domestiques s'y aventurant. Jusqu'à 20 % des champs conduisent à la mortalité de la moitié des bourdons qui y butinent. Ces deux mêmes années, environ 10 % des parcelles présentent un tel risque pour les abeilles solitaires.

« Nous avons utilisé un modèle conservateur, celui de l'Autorité européenne de sécurité des aliments, précise M. Bretagnolle. *Celui-ci ne tient compte que de la mortalité induite par le produit pur, et non des effets de synergies possibles avec des pathogènes naturels ou d'autres pesticides présents sur la parcelle. Il n'évalue pas non plus les effets sublétaux. »* Ces effets, non directement mortels, peuvent survenir chez certains pollinisateurs dès la consommation régulière de nectar ou de pollen contaminés à hauteur de 0,1 ppb – soit plus de 400 fois moins que les plus hautes concentrations retrouvées par les chercheurs français. Ces effets peuvent affecter la fertilité, l'immunité ou encore les capacités d'orientation des individus et ainsi éroder, année après année, les populations de pollinisateurs.

« Ces résultats sont doublement alarmants, estime l'écologue Fabrice Helfenstein, qui n'a pas participé à ces travaux. *D'abord parce qu'ils montrent que la fréquence de détection de ces produits est élevée, ensuite parce qu'on ne constate pas de déclin, dans le temps, de cette fréquence de détection et de leur concentration dans l'environnement. »* Les chercheurs français ont cherché des éléments de réponse à cette énigme : ils constatent, notamment, que les années pluvieuses coïncident avec l'étendue de la contamination des parcelles.

L'effet des fortes pluies

« Il est plausible que ces substances, qui sont solubles dans l'eau, sont remobilisées en cas de fortes pluies, et redistribuées sur des parcelles n'ayant pas nécessairement été traitées l'année précédente », dit M. Bretagnolle. Les néonicotinoïdes étant des molécules dites « systémiques » (qui imprègnent tous les tissus de la plante), elles peuvent être réabsorbées par la végétation poussant sur des sols contaminés. Un constat étayé par plusieurs travaux récents, montrant notamment que le nectar et le pollen des fleurs sauvages poussant aux marges des parcelles traitées sont une voie d'exposition importante des abeilles à ces produits.

En dépit du caractère frappant de ces résultats, M. Helfenstein se dit *« peu étonné »*. *« Vu le caractère massif de leur utilisation au cours des dernières années, principalement en traitement préventif des semences, on peut s'attendre à trouver des néonicotinoïdes dans tous les paysages où ils ont été utilisés »*, dit-il. L'écologue parle en connaissance de cause : il a dirigé des travaux analogues publiés en mars dans le *Journal of Applied Ecology*, conduits par plusieurs chercheurs de l'université de Neuchâtel (Suisse). Avec des conclusions allant dans le même sens.

Ces chercheurs ont tenté d'évaluer la présence des principaux « néonics » sur des parcelles conventionnelles, biologiques ou dans des zones d'intérêt écologique (bocages, prairies, etc.), soumises à des mesures de préservation environnementales strictes. Les chercheurs avaient collecté plus de 700 échantillons de sols et de végétations prélevés dans des exploitations ou des propriétés de l'ensemble des régions de basse altitude de la Confédération helvétique.

Tous les échantillons d'exploitations conventionnelles contenaient au moins un « néonic », tandis que 93 % de ceux prélevés sur des fermes « bio » en contenaient également. Et ce, alors que les exploitations en question étaient converties depuis au moins dix ans. Plus étonnant : 80 % des prélèvements effectués dans les zones d'intérêt écologique portaient aussi des traces de ces substances.

Les chercheurs suisses ont utilisé une autre méthode d'évaluation des risques que celle de leurs confrères français. Ils ont considéré 72 espèces d'invertébrés favorables aux cultures (pollinisateurs, prédateurs d'espèces nuisibles, etc.) et, en se fondant sur la toxicité d'un seul des produits mesurés (la clothianidine), ils estiment que les taux de cette seule substance retrouvée sur les parcelles conventionnelles représentent un risque létal pour 5,3 % à 8,6 % des espèces considérées et un risque sublétal pour 31,6 % à 41,2 % d'entre elles. Ces risques sont très inférieurs sur les autres parcelles (« bio » et zones d'intérêt écologique).

Chercheurs suisses et français espèrent désormais trouver des financements pour maintenir un réseau de surveillance de la rémanence de ces produits dans l'environnement des deux pays. *« Ce projet a démarré en 2018, c'est-à-dire l'année de leur interdiction, non seulement sur les cultures attractives pour l'abeille, mais aussi sur le blé, l'orge, etc.*, explique Sabrina Gaba (INRA), coordinatrice du projet. *Il concerne dix sites en France, représentant toutes les zones de grandes cultures françaises. »*

Stéphane Foucart, *Le Monde* daté du 28.11.2019

POURQUOI CET ARTICLE ?

Cet article fait un point très intéressant sur la persistance des insecticides néonicotinoïdes dans les plantes et les sols, en relatant une étude de grande ampleur réalisée en Suisse.
Depuis plusieurs années, il est clairement établi que les insecticides néonicotinoïdes utilisés en agriculture sont toxiques pour de nombreux animaux, en particulier pour les auxiliaires de culture comme les insectes pollinisateurs et les prédateurs des ravageurs des cultures. Ainsi, l'utilisation des néonicotinoïdes a contribué et contribue encore massivement à l'effondrement de ces populations animales. Depuis le 1er septembre 2018, l'utilisation des néonicotinoïdes est interdite en Europe, mais des études de terrain réalisées en Suisse montrent que la contamination des parcelles par ces molécules et leurs effets sur les populations animales qui y sont sensibles risquent de perdurer de nombreuses années. De plus, en France, à l'automne 2020, l'autorisation de l'utilisation des néonicotinoïdes sur les betteraves sucrières victimes d'un pathogène est un signal inquiétant pour la préservation de l'environnement.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Un tabac transgénique plus productif

Agronomie – Une équipe américaine a augmenté de 40 % la biomasse de cette plante modèle en améliorant la photosynthèse. Des essais sur la pomme de terre sont en cours

La nature n'est pas toujours très bien faite. Un exemple ? Les organismes photosynthétiques – qui utilisent la lumière du soleil pour former les molécules carbonées dont ils ont besoin – dépendent depuis des milliards d'années d'une enzyme baptisée Rubisco, dont le rendement reste médiocre. Cela tient au fait que Rubisco, qui initialement réagissait avec le CO_2 présent dans l'atmosphère, le fait aussi avec l'oxygène, dont la teneur dans l'air a augmenté au fil des âges géologiques précisément grâce aux réactions de photosynthèse. Le résultat est que la concurrence croissante de l'oxygène a nécessité des réactions dites de photorespiration pour détoxifier les végétaux de certains composés, réduisant considérablement le rendement final.

Le maïs, le sorgho ou encore la canne à sucre disposent bien d'un double système mettant plus efficacement en contact le CO_2 et Rubisco. On parle de plantes en C4. Mais celles en C3, comme le blé, le soja, la pomme de terre, le riz ou les arbres, sont en revanche plus handicapées par l'activité photorespiratoire, qui peut diminuer jusqu'à 50 % la conversion de lumière en biomasse, particulièrement par temps chaud et sec. C'est aussi le cas du tabac, végétal modèle prisé des biologistes.

Une équipe américaine, dirigée par Paul South (université de l'Illinois à Urbana) vient cependant de montrer que chez *Nicotina tabacum*, des hausses de rendement allant jusqu'à 40 % de matière sèche pouvaient être obtenues en court-circuitant certaines réactions de photorespiration. Leurs résultats, présentés dans la revue *Science* du 4 janvier, s'inspirent d'améliorations obtenues par génie génétique sur une autre plante modèle, *Arabidopsis thaliana*, au cours de la dernière décennie.

L'équipe américaine a donc puisé dans l'ADN de différents organismes des gènes qu'ils ont assemblés dans le but de doter le tabac de trois circuits alternatifs de photorespiration. Certains de ces montages comptaient jusqu'à sept gènes, empruntés à la bactérie *E. coli*, à une algue verte (*Chlamydomonas*), à *Arabidopsis*, ou encore au potiron. En outre, les chercheurs ont utilisé la technique dite de l'interférence ARN pour entraver l'action de certains gènes et réduire encore les opérations de détoxification.

Essai sur les plantes de culture

Après avoir sélectionné les plantes les plus prometteuses en laboratoire, l'équipe de Paul South a étudié en 2016 et 2017 leurs performances dans des essais en champ. Si deux des voies de modification de la photorespiration explorées n'apportaient aucune amélioration, les lignées dans lesquelles des gènes de potiron et d'algue verte avaient été introduits bénéficiaient du meilleur rendement, un gain pouvant atteindre 40 %.

« Il reste à voir si l'augmentation de biomasse que nous avons observée dans ces tabacs transgéniques peut se traduire par un accroissement de production de graines ou de tubercules dans des plantes de culture telles que le soja, la pomme de terre ou des plantes fourragères », écrivent les chercheurs dans *Science*. Ils se disent *« optimistes »* et ont commencé des essais sur la pomme de terre, une solanacée, comme le tabac. Riz, soja et niébé (sorte de haricot tropical) devraient suivre en 2019.

Jean-François Morot-Gaudry, directeur de recherche honoraire à l'INRA et auteur de plusieurs monographies récentes sur les modifications de la photosynthèse, salue *« de belles réalisations scientifiques »*, mais invite à la prudence : *« Les résultats agronomiques ne sont pas encore acquis, ils doivent être confirmés dans la durée. Mais la possibilité de modifier les mécanismes photosynthétiques immuables devient envisageable. »*

Dans un commentaire sur ces travaux publié dans *Science*, Marion Eisenhut et Andreas Weber, de l'université de Düsseldorf, louent aussi les résultats de l'équipe américaine, qui s'est inspirée de leurs propres travaux. *« Les gains de rendements annuels obtenus par sélection des plantes sont typiquement inférieurs à 2 % »*, rappellent-ils. Les 40 % obtenus d'un coup par leurs collègues les poussent à penser qu'avec ce type de modification génétique, l'amélioration des rendements va *« franchir un palier »*.

Ils soulignent aussi que ces améliorations nécessitent l'emprunt à d'autres espèces de gènes non présents dans le génome des plantes cibles : les techniques nouvelles d'édition du génome ou la sélection variétale classique par croisements ne peuvent fournir ces enzymes aux grandes cultures. On reste donc dans le cadre des plantes transgéniques (OGM) et de leurs modalités d'enregistrement et d'autorisation.

Paul South estime que si ses transgènes se montrent aussi efficaces sur les grandes cultures, il faudra une dizaine d'années avant une mise sur le marché. Ce qui le place encore dans les temps pour contribuer à répondre à l'explosion de la demande alimentaire mondiale liée à la démographie humaine.

Et l'industrie cigarettière ? Va-t-elle s'emparer de ce tabac transgénique à haut rendement ? Serait-ce un faux pas marketing que d'accoler l'étiquette OGM à *N. tabacum* qui, dans sa forme naturelle, selon des projections de l'Organisation mondiale de la santé, pourrait tuer près d'un milliard d'humains au cours du XXIe siècle ?

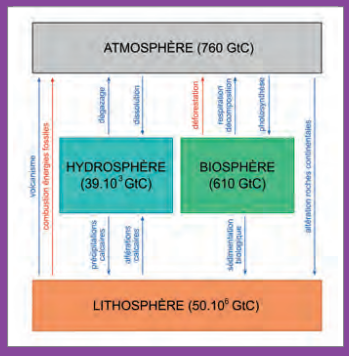
Hervé Morin, *Le Monde* daté du 09.01.2019

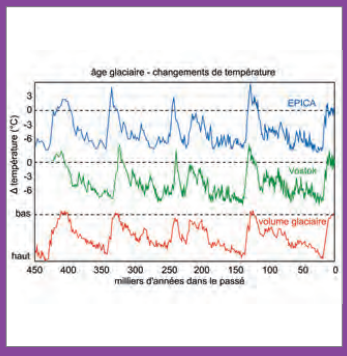
POURQUOI CET ARTICLE ?

Cet article présente les résultats très prometteurs obtenus par une équipe américaine qui a produit des plants de tabac génétiquement modifiés. Cette voie de recherche peut-elle constituer un apport prometteur pour améliorer, dans le futur, la nutrition de l'humanité ?

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

LES CLIMATS DE LA TERRE : COMPRENDRE LE PASSÉ POUR AGIR AUJOURD'HUI ET DEMAIN





© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

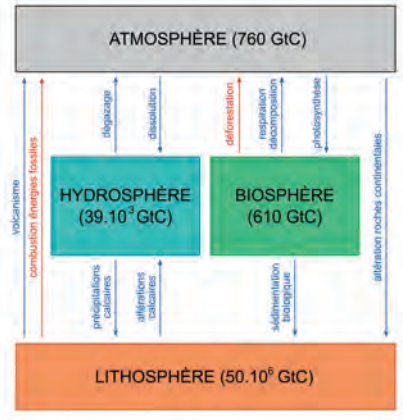
Les variations climatiques passées et actuelles

Le système climatique terrestre est complexe et l'effet de serre y joue un rôle majeur. Celui-ci consiste en l'absorption par certains gaz atmosphériques du rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre, ce qui provoque une élévation de la température de la planète. L'intensité de l'effet de serre augmente avec la concentration atmosphérique de ces gaz. Depuis 150 ans, le climat planétaire présente un réchauffement d'environ 1 °C, dont les conséquences sont déjà observables. Quelles sont les variations climatiques passées ? Quels sont les enjeux actuels du réchauffement climatique ?

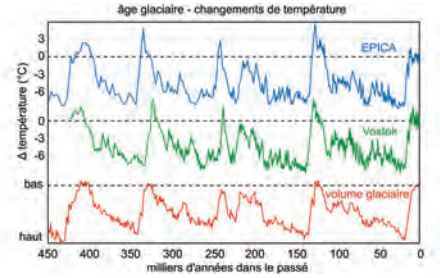
Reconstituer et comprendre les variations climatiques passées

En l'absence d'activités humaines productrices de gaz à effet de serre, la température terrestre moyenne de +15 °C résulte d'un effet de serre naturel, observable durant l'ère préindustrielle, avant 1870. Depuis 150 ans, les activités humaines (combustion d'énergie fossile, déforestation, fabrication de ciment, pratiques agricoles, etc.) perturbent le **cycle biogéochimique du carbone** par l'émission dans l'atmosphère de **gaz à effet de serre** (CO_2, CH_4, etc.), responsables d'une **augmentation de 1 °C** de la température terrestre.

Les données préhistoriques, géologiques (études des moraines) et paléo-écologiques (palynologie et dendrologie, ou étude des cernes de croissance des troncs des arbres) montrent l'existence entre **–120 000 et –11 000 ans** de la dernière **glaciation**, appelée Würm en Europe. Les données géologiques et les mesures du $\delta^{18}O$ des glaces polaires et des sédiments (carbonates) mettent en évidence une **alternance de périodes glaciaires et interglaciaires** durant **les 800 000 dernières années**.



Cycle biogéochimique simplifié du carbone (1 GTC : 109 tonnes de carbone) (en rouge : flux liés aux activités humaines).



Les variations de températures depuis 450 000 ans obtenues à partir des études isotopiques de la glace en Antarctique.

Ces **variations cycliques du climat sur les 800 000 dernières années** coïncident avec les variations périodiques des **paramètres orbitaux de la Terre** : variations de l'excentricité de l'orbite terrestre, de l'angle d'inclinaison de l'axe de rotation terrestre, et de la position des équinoxes sur l'orbite terrestre (précession des équinoxes). Elles ont modifié la puissance solaire, entraînant un **forçage radiatif positif ou négatif**, et ont été amplifiées par des **boucles de rétroaction**. Une première boucle concerne **l'albédo**, qui est la proportion d'énergie solaire réfléchie parmi l'énergie solaire reçue par une surface. Lors d'un refroidissement, l'extension des surfaces claires de glace ou neige, à fort albédo, entraîne une baisse de la puissance solaire absorbée par la Terre, ce qui accentue le refroidissement. Une seconde boucle est liée à **l'effet de serre**. La solubilité du CO_2 dans l'eau augmente quand la température baisse. Un refroidissement favorise donc sa dissolution

ZOOM SUR…

LES MÉTHODES ISOTOPIQUES : LES MÉTHODES ISOTOPIQUES : LES THERMOMÈTRES $\delta^{18}O$ DE LA GLACE ET $\delta^{18}O$ DES CARBONATES

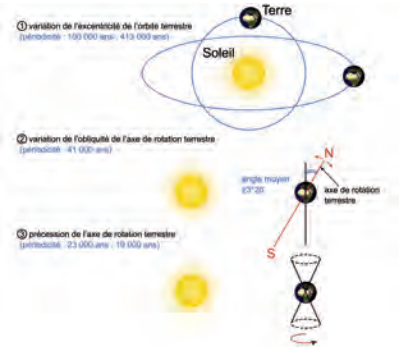
Le paramètre $\delta^{18}O$ reflète le rapport isotopique $^{18}O/^{16}O$ de l'échantillon étudié. Le $\delta^{18}O$ des glaces polaires évolue de manière linéaire en fonction de la température existant lors de la formation de la glace. Au niveau des glaces polaires, des forages permettent de récolter des carottes de glace, d'autant plus anciennes qu'elles sont profondes. Les estimations de la date de la formation de la glace et de la valeur du $\delta^{18}O$ des échantillons permettent de déterminer l'évolution passée des températures. Un autre thermomètre, le $\delta^{18}O$ des carbonates, est mis au point à partir des rapports isotopiques de l'oxygène présent dans les coquilles des foraminifères (unicellulaires marins) trouvées dans les sédiments océaniques. L'évolution du $\delta^{18}O$ des carbonates est inversement proportionnelle à l'évolution de la température. Ainsi, les températures passées peuvent être reconstituées grâce au $\delta^{18}O$ de la glace (jusqu'à –450 000 ans) et au $\delta^{18}O$ des carbonates (jusqu'à –135 Ma).

LA PALYNOLOGIE

Étude des pollens et des spores présents dans des sols et les roches. Les grains de pollen peuvent être conservés longtemps dans des sédiments continentaux, et leur morphologie est spécifique de leur espèce. L'évolution temporelle de l'abondance des pollens de différentes espèces dans les échantillons récoltés permet de déterminer les espèces végétales présentes. La connaissance des exigences climatiques de ces végétaux permet de déduire l'évolution du climat local au cours du temps.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

dans l'eau, réduisant son taux atmosphérique, d'où une baisse de l'effet de serre qui accentue le refroidissement. Ces boucles de rétroaction sont à l'origine des **entrées et des sorties de glaciation** au Quaternaire.



Cycles de Milankovitch : variations cycliques des paramètres astronomiques à l'origine des variations climatiques.

À l'échelle du **Cénozoïque** (qui a débuté il y a 65,5 millions d'années) et depuis 30 millions d'années, les études du $\delta^{18}O$ des carbonates montrent une **baisse de la température** moyenne du globe. Ce refroidissement est expliqué par une baisse de la concentration atmosphérique en CO_2, liée à **l'altération** des matériaux continentaux suite aux orogénèses himalayenne et alpine. En effet, l'altération des minéraux silicatés s'accompagne d'une consommation de CO_2 atmosphérique. De plus, les changements de la disposition de **masses continentales** résultant de la tectonique des plaques ont modifié la circulation océanique : l'individualisation de l'Antarctique a entraîné l'installation d'une importante calotte glaciaire au pôle Sud, encore présente actuellement.

Au **Mésozoïque** (−251 à −65 millions d'années), et notamment au **Crétacé**, des roches sédimentaires (évaporites, bauxites, latérites, etc.) formées en climat chaud à de nombreuses latitudes mettent en évidence une **hausse de la température** terrestre. La **forte activité magmatique** des dorsales et des points chauds est responsable de l'augmentation du taux atmosphérique de CO_2, d'où une température terrestre élevée, associée à l'absence de calottes polaires.

Au **Paléozoïque** (−542 à −251 millions d'années), des indices paléontologiques et géologiques révèlent une importante **glaciation au Permien-Carbonifère**. Le fort piégeage du CO_2 dans les **roches carbonées** (charbon, pétrole, etc.) et **l'altération** de la chaîne hercynienne ont réduit le taux atmosphérique de CO_2, d'où une diminution de la température terrestre.

Altération des roches de croûte continentale.

Comprendre les conséquences du réchauffement climatique et les possibilités d'action

Cette partie ne sera pas évaluée à l'épreuve écrite du baccalauréat.

Depuis plusieurs dizaines d'années, des efforts de **recherche scientifique** sont menés pour élaborer un **modèle robuste sur le changement climatique**, ses **causes** et ses **conséquences**, ainsi que pour définir les **actions** nécessaires. Depuis 1988, sous l'égide de l'ONU, le **GIEC** (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat), élabore sur la base d'un **consensus scientifique** une analyse rigoureuse de **l'état des connaissances** destinée aux décideurs. Le réchauffement climatique est responsable d'une **augmentation de la fréquence des événements climatiques extrêmes** (tempêtes, inondations, sécheresses, etc.). Il affecte la **biodiversité** en modifiant les caractéristiques des populations (effectifs, état sanitaire, répartition à la surface du globe) ainsi que leur évolution, et il a des impacts sur la santé humaine. L'augmentation de la concentration atmosphérique en CO_2 favorise la **production de biomasse**, mais ses effets indirects perturbent les **écosystèmes naturels et agricoles** (désertification, montée du niveau marin, diminution des ressources en eau et de la qualité des sols, diffusion de pathogènes, etc.).

En 2015, la **COP 21** a engagé les pays signataires de l'accord à contenir le réchauffement climatique **en 2100 à 2 °C** de variation par rapport à la valeur moyenne de la température terrestre de l'époque préindustrielle (vers 1870). Avant cette date, le taux moyen de CO_2 atmosphérique était d'environ 280 ppm (partie par millions). Le taux moyen de CO_2 actuel avoisine 410 ppm. Le maintien d'un réchauffement inférieur à 2 °C en 2100 nécessite de limiter le taux moyen de CO_2 atmosphérique **à 500 ppm en 2100**, soit une baisse drastique des émissions de CO_2 atmosphérique, pour aboutir à des activités humaines globalement **neutres**.

TROIS ARTICLES DU *MONDE* À CONSULTER

- Les experts français du climat aggravent leurs projections pour 2100 p. 50
(Audrey Garric, *Le Monde* daté du 18.09.2019)
- Les migrations des espèces plus rapides en mer que sur terre p. 51
(Clémentine Thiberge, *Le Monde* daté du 27.05.2020)

MOTS-CLÉS

ATTÉNUATION
Ensemble des actions visant à diminuer l'ampleur du réchauffement climatique. L'axe prioritaire est la limitation de la production de gaz à effet de serre, par une baisse de la consommation des énergies fossiles, le développement des énergies renouvelables, l'amélioration de l'efficacité énergétique et la promotion de pratiques agricoles adaptées. L'autre axe est de favoriser la séquestration du CO_2, soit de manière naturelle, par une gestion adaptée des écosystèmes naturels et agricoles, soit de manière artificielle par le stockage de CO_2 industriel dans des réservoirs appropriés. Cette dernière technique, certes intéressante, est coûteuse, risquée et peu généralisable : elle ne constitue pour l'instant qu'un outil mineur de l'atténuation.

ADAPTATION
Démarche d'ajustement au changement climatique et à ses conséquences, afin d'anticiper les impacts sur les territoires et les sociétés. Il s'agit de se préparer à des aléas climatiques plus fréquents et plus intenses (sécheresses, canicules, tempêtes, etc.) et à leurs conséquences (incendies, coulées de boues, etc.). L'adaptation vise à anticiper les conséquences du réchauffement climatique sur l'environnement (augmentation du niveau marin, érosion littorale, etc.) et sur les activités humaines (diminution des ressources en eau, baisse de la productivité des systèmes agricoles, etc.). En France, le Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNACC), créé en 2011 et réactualisé en 2018 pour 5 ans, vise à intégrer les adaptations nécessaires dans les politiques publiques.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

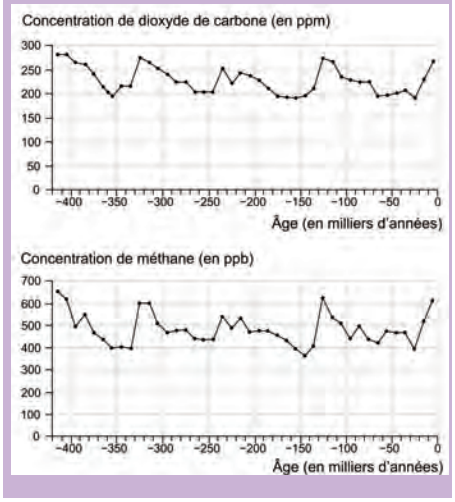
Variations climatiques entre −130 000 et −120 000, exercice 2

Le sujet (d'après bac S, 2017, Asie)

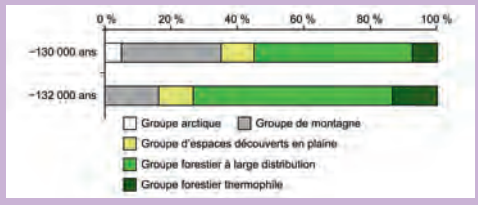
Les derniers 800 000 ans sont marqués par des variations climatiques importantes où alternent périodes glaciaires et périodes interglaciaires.

À partir de l'exploitation des indices de terrain proposés mis en relation avec vos connaissances, déterminez le sens de variation du climat et son origine pendant la période étudiée.

Document 1 – Évolution de la composition en CO_2 et méthane, deux gaz à effet de serre, depuis 400 000 ans (les mesures ont été réalisées dans les glaces antarctiques).

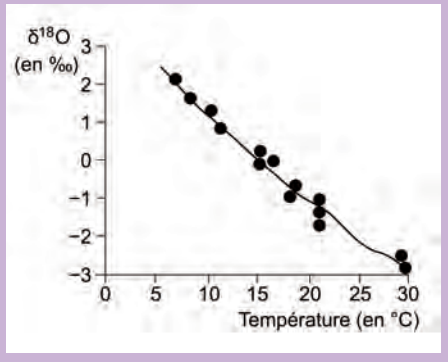


Document 3 – Climatogrammes obtenus à partir des fossiles des grands mammifères trouvés dans la grotte du Lazaret.
Un climatogramme correspond à une classification des animaux selon leurs affinités climatique et/ou écologique. Les groupes écologiques sont représentés sous forme de graphique en pourcentage, selon un ordre précis, depuis un environnement sous climat froid (à gauche) vers un environnement sous climat tempéré (à droite).

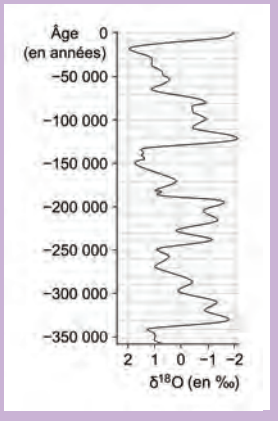


D'après C. Hanquet et al., *Caractérisation du climat et de la biodiversité au Pléistocène moyen final, d'après les faunes de vertébrés de la grotte du Lazaret (Nice)*, France, 2010.

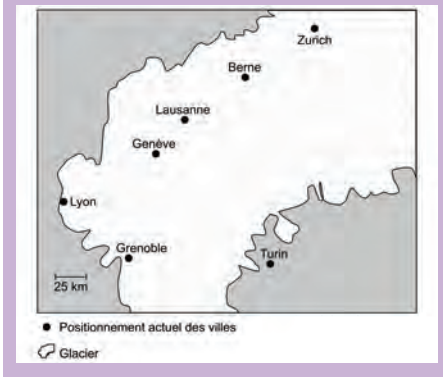
Document 4 – Étude du $\delta^{18}O$ mesuré dans les coquilles de mollusques marins.
Document 4.a – Variations du $\delta^{18}O$ (mesuré dans le carbonate de calcium des coquilles des animaux marins) en fonction de la température de l'eau.



Document 4.b – Évolution du $\delta^{18}O$ des coquilles de mollusques marins fossiles trouvés dans la grotte du Lazaret (Nice).



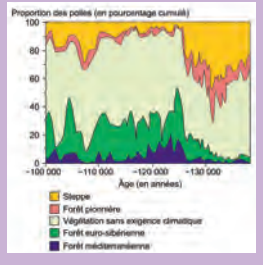
Document 2 – Extension des glaciers des Alpes.
Document 2.a – Carte de l'extension au cours de la période allant de −180 000 à −140 000.



Document 2.b – Carte de l'extension actuelle.
L'extension des glaciers des Alpes au cours de la période allant de −130 000 à −120 000 est semblable à l'extension actuelle.

D'après http://www.glims.org

Document 5 – Données palynologiques relevées au Portugal.
Document 5.a – Étude des proportions de pollens de végétaux regroupés selon les affinités climatiques.



D'après N.J. Shackleton et al., *Marine Isotope Substage 5e and the Eemian Interglacial*, 2002.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Document 5.b — Végétation et paramètres climatiques.

Type de végétation	Type de climat associé
Steppe	Froid et sec
Forêt pionnière	Frais et humide
Forêt euro-sibérienne	Tempéré
Forêt méditerranéenne	Chaud avec sécheresse estivale et hiver doux

CE QU'IL NE FAUT PAS FAIRE

Se tromper dans l'exploitation des $\delta^{18}O$ des coquilles.

Le corrigé

Au cours de l'histoire de la Terre, le climat a connu de nombreuses variations de différentes ampleurs. L'étude des indices climatiques passés a mis en évidence une alternance régulière de glaciations et de périodes interglaciaires au Quaternaire. Différentes données climatiques concernant la période entre –130 000 et –120 000 sont disponibles. Durant cette période, comment le climat a-t-il varié et quelle est l'origine de cette variation ? Pour caractériser cette évolution climatique, nous allons étudier différents indices de terrain (extension glaciaire, climatogrammes, données palynologiques et étude du $\delta^{18}O$ de coquilles de mollusques marins). Puis, nous établirons l'origine de cette variation climatique en analysant l'évolution de la concentration de certains gaz atmosphériques entre –130 000 et –120 000.

I. Caractérisation de la variation climatique entre –130 000 et –120 000

Pour caractériser la variation climatique entre –130 000 et –120 000, nous allons étudier successivement différents indices de terrain récoltés, puis confronter les conclusions qu'ils permettent d'établir. Le document 2 propose de comparer l'extension des glaciers dans les Alpes de –180 000 à –140 000 avec l'extension actuelle. Entre –180 000 et –140 000, les Alpes étaient recouvertes par un seul vaste glacier, montrant une importante extension glaciaire à cette époque. Aujourd'hui, il ne reste que quelques glaciers séparés les uns des autres. L'extension actuelle, semblable à celle de –130 000 à –120 000, est donc beaucoup plus réduite que celle de –180 000 à –140 000. Étant donné que l'intensité de l'extension glaciaire est un indicateur du caractère froid du climat, on en déduit l'existence d'un climat plus chaud entre –130 000 et –120 000 qu'entre –180 000 et –140 000.

Le document 3 présente deux climatogrammes donnant la classification des animaux selon leurs affinités climatique ou écologique, l'un en –130 000 et l'autre en –120 000. De –130 000 à –120 000, le groupe d'animaux à affinité arctique disparaît (de 5 % en –130 000 à 0 % en –120 000), et la proportion du groupe de montagne se réduit (de 30 % en –130 000 à 15 % en –120 000). En revanche, le pourcentage d'animaux du groupe forestier à large distribution augmente entre –130 000 (47 %) et –120 000 (60 %), tout comme celle du groupe forestier thermophile (de 8 % en –130 000 à 12 % en –120 000). De –130 000 à –120 000, la diminution de la proportion des animaux préférant les climats froids s'accompagne d'une augmentation de la proportion des animaux préférant les climats tempérés, ce qui met ainsi en évidence un réchauffement entre –130 000 et –120 000.

Le document 5 présente l'évolution au cours du temps des proportions de pollens récoltés entre –140 000 et –100 000 au Portugal, et classés selon leurs affinités climatiques. Entre –130 000 et –120 000, la proportion de pollens de steppe, correspondant à un climat froid et sec, se réduit fortement (de 50 % en –130 000 à 3 % en –120 000). La proportion de pollens de la forêt euro-sibérienne, typique d'un climat tempéré, augmente (de 10 % en –130 000 à 27 % en –120 000 ans), de même que celle des pollens de la forêt méditerranéenne, spécifique d'un climat avec sécheresse estivale et hiver doux (de 2 % en –130 000 à 10 % en –120 000). Les données palynologiques montrent donc un réchauffement du climat de –130 000 à –120 000.

Enfin, le document 4 présente l'évolution du $\delta^{18}O$ mesuré dans les coquilles de mollusques marins depuis 350 000 ans. Le $\delta^{18}O$ des coquilles évolue avec la température, de manière inversement linéaire : plus la température de l'eau régnant lors de la formation des coquilles est élevée, plus le $\delta^{18}O$ des coquilles est faible (document 4.a). Ce $\delta^{18}O$ constitue un thermomètre isotopique permettant d'estimer la température de l'eau lors de la formation des coquilles. D'après le document 4.b, entre –130 000 et –120 000, le $\delta^{18}O$ des coquilles diminue fortement, passant de 1,4 ‰ en –130 000 à –2 ‰ en –120 000. La mise en relation des documents 4.a et 4.b permet d'établir que la température de l'eau était d'environ 10 °C en –130 000 et de 24 °C en –120 000. Cette augmentation importante de la température met en évidence un réchauffement entre –130 000 et –120 000. Ainsi, l'ensemble des données climatiques étudiées aboutit à la conclusion qu'il y a eu un réchauffement entre –130 000 et –120 000. Quelle est l'origine de ce réchauffement ?

II. Origine de la variation climatique entre –130 000 et –120 000

Le document 1 présente les variations de la concentration atmosphérique de CO_2 et de CH_4, depuis 400 000 ans, grâce à des analyses de glaces antarctiques. Les concentrations atmosphériques de CO_2 et CH_4 augmentent entre –130 000 (200 ppm pour le CO_2, 500 ppb pour le CH_4) et –120 000 (240 ppm pour le CO_2, 610 ppb pour le CH_4). La période située entre –130 000 et –120 000 présente donc des valeurs de concentrations atmosphériques en gaz à effet de serre, CO_2 et CH_4, supérieures à la période précédente. Or, l'augmentation de ces concentrations entraîne une augmentation de l'effet de serre, qui est l'absorption du rayonnement infrarouge terrestre par certains gaz atmosphériques et la réémission de ce rayonnement vers le sol, contribuant à l'augmentation de la température terrestre. Ainsi, entre –130 000 et –120 000, l'augmentation des concentrations atmosphériques en CO_2 et en CH_4 a entraîné une augmentation de l'effet de serre à l'origine du réchauffement mis en évidence.

Les données climatiques, comme l'étude de l'extension glaciaire dans les Alpes, des caractéristiques de la faune et de la flore, montrent un réchauffement entre –130 000 et –120 000. Le $\delta^{18}O$ des coquilles permet d'estimer l'importante augmentation de température de l'eau (+14 °C) à cette époque. Ainsi, la période de –130 000 à –120 000 correspond à une augmentation importante de la température terrestre, due au moins en partie à une augmentation de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre (CO_2 et CH_4). Mais quels sont les phénomènes qui ont entraîné une telle variation des concentrations atmosphériques de ces gaz et dans quelle mesure les mécanismes autoamplificateurs du climat ont-ils accéléré cette variation climatique ?

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Les experts français du climat aggravent leurs projections pour 2100

Un vaste exercice de simulation doit servir de référence au prochain rapport du GIEC

Les canicules à répétition, records de température et autres vagues de sécheresse qui déferlent sur la planète ne sont qu'un triste avant-goût de ce qui attend l'humanité. Si rien n'est fait pour limiter les émissions de gaz à effet de serre, le réchauffement climatique pourrait atteindre 7 °C d'ici à la fin du siècle, entraînant des conséquences désastreuses pour les espèces et les écosystèmes. Ces résultats, qui aggravent les précédentes projections, sont publiés, mardi 17 septembre, par les plus grands laboratoires français de climatologie, engagés dans un vaste exercice de simulation du climat passé et futur.

Dans le cadre du programme mondial de recherche sur le climat, une vingtaine de centres américains, européens, chinois ou encore japonais ont réalisé, ces dernières années, des centaines de modélisations pour mieux comprendre les changements climatiques mais aussi pour tester la fiabilité de leurs modèles en les comparant aux observations et à d'autres modèles.

En France, la tâche colossale a impliqué une centaine de chercheurs et d'ingénieurs qui ont simulé plus de 80 000 ans d'évolution du climat, en utilisant des supercalculateurs pendant une année, nécessitant 500 millions d'heures de calcul et générant 20 pétaoctets (20 millions de milliards d'octets) de données. Leurs conclusions serviront de référence au sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), dont le premier volet sortira en 2021.

Les deux modèles que les Français ont développés prédisent une augmentation continue de la température moyenne du globe au moins jusqu'en 2040, pour atteindre environ 2 °C, quelle que soit l'évolution des émissions de gaz à effet de serre – en raison de l'inertie du système climatique. Ensuite, tout dépendra des politiques mises en œuvre dès maintenant par les États pour limiter ou non les rejets carbonés. Dans le pire des scénarios, celui d'une croissance économique rapide alimentée par des énergies fossiles, le thermomètre grimpera en moyenne de 6,5 °C à 7 °C en 2100, soit un degré de plus que ce que prévoyaient les précédents modèles, en 2012.

« Nos nouveaux modèles ont beaucoup progressé et reproduisent mieux le climat observé. Ils simulent plus de réchauffement en réponse au CO_2 que l'ancienne génération, explique Olivier Boucher, directeur adjoint (CNRS) de l'Institut Pierre-Simon-Laplace. *L'une des raisons est une rétroaction plus forte due à la vapeur d'eau : un monde plus chaud est aussi un monde plus humide ; or la vapeur d'eau est un gaz à effet de serre qui amplifie le réchauffement climatique. »*

« C'est un réchauffement énorme et surtout très rapide, sur une centaine d'années », précise Pascale Braconnot, spécialiste de la modélisation du climat au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement. *« Pendant la dernière déglaciation, qui s'était déroulée sur 10 000 ans, la température avait augmenté d'environ 3-4 °C à l'échelle globale »*, rappelle-t-elle.

Un seul des huit scénarios examinés par les scientifiques permet tout juste de respecter l'accord de Paris adopté en 2015, qui prévoit de limiter le réchauffement *« bien en deçà de 2 °C »* et *« si possible à 1,5 °C »*. Suivre cette trajectoire implique des efforts drastiques, afin de diminuer immédiatement les émissions de CO_2 jusqu'à atteindre la neutralité carbone à l'échelle de la planète vers 2060. La température dépasserait alors la barre des 2 °C, avant de se rapprocher des 1,5 °C vers la fin du siècle, grâce à une captation de CO_2 atmosphérique de l'ordre de 10 à 15 milliards de tonnes par an en 2100 – mais dont la faisabilité à une telle échelle reste très incertaine.

Cet emballement global des températures cache des disparités régionales. À la fin du siècle, le réchauffement sera particulièrement marqué sur les hautes latitudes de l'hémisphère nord, notamment en Arctique. En France et en Europe de l'Ouest, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des

POURQUOI CET ARTICLE ?

Cet article récent présente le constat alarmant des scientifiques de plusieurs pays qui ont travaillé de manière précise et rigoureuse sur les simulations de l'évolution climatique.
Alors qu'en France les sécheresses et les épisodes caniculaires deviennent de plus en plus fréquents, en lien avec une augmentation de 1 °C de la température par rapport à l'ère préindustrielle, les chercheurs prévoient que l'augmentation de la température moyenne terrestre pourrait atteindre environ 2 °C en 2040, quelles que soient les mesures prises pour la limiter. De plus, si aucune politique mondiale sérieuse n'est appliquée, l'augmentation prévue serait d'en moyenne 7 °C d'ici à la fin du siècle, ce qui représente une augmentation considérable. Cette augmentation de température varierait selon les régions et entraînerait la disparition complète de la banquise en fin d'été, dès 2080.
Mais comment expliquer l'aggravation des prévisions climatiques ? Ces modèles tiennent maintenant davantage compte de l'augmentation de la température et de l'humidité. En particulier, l'augmentation de la vapeur d'eau (qui est un puissant gaz à effet de serre) dans l'atmosphère amplifie le réchauffement climatique, beaucoup plus que ce qui avait été prévu dans les modèles plus anciens.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

vagues de chaleur, déjà à l'œuvre, va se poursuivre au moins dans les deux prochaines décennies, quelle que soit la trajectoire des émissions. Après 250, dans les scénarios les plus émetteurs, l'été 2003 – dont la canicule avait tué plus de 70 000 personnes en Europe – sera la norme.

Disparition de la banquise en été

Les deux modèles prédisent également une disparition complète de la banquise en fin d'été, dès 2080, en cas d'émissions élevées de gaz à effet de serre. Mais, même dans le cas de rejets limités, l'un des modèles simule une quasi-disparition des glaces marines estivales, tandis que l'autre montre un très faible englacement.

Côté précipitations, elles augmenteront dans les zones déjà humides, notamment une grande partie du Pacifique tropical, sur les mers australes et dans de nombreuses régions des moyennes à hautes latitudes de l'hémisphère nord. À l'inverse, le pourtour méditerranéen s'asséchera, à l'image de nombreuses zones semi-arides.

« Ces nouveaux modèles, même s'ils ont un maillage qui a été affiné – de l'ordre de 100 ou 150 km –, ne peuvent pas représenter des phénomènes plus fins comme des cyclones, remarque Pascale Braconnot. *Mais ils ont servi de base à une modélisation à une haute résolution de 12 km que Météo-France a réalisée sur l'Europe et l'océan Indien. »* La régionalisation des modèles permet de voir apparaître de nouveaux phénomènes. Comme les conséquences des politiques de lutte contre la pollution de l'air mises en place par la Chine : elles limitent la quantité d'aérosols présents dans l'atmosphère – qui ont un pouvoir refroidissant –, et par là peuvent paradoxalement aggraver le réchauffement.

Toutes ces données climatiques, en libre accès, devront maintenant être revues, analysées et croisées afin d'affiner encore la compréhension des modèles et des incertitudes. Même si l'on en sait assez pour limiter les émissions et ce, depuis longtemps. ●

Audrey Garric,
Le Monde daté du 18.09.2019

Les migrations des espèces plus rapides en mer que sur terre

Face à la hausse des températures, les animaux terrestres sont plus lents à se déplacer

Un peu plus de 6 kilomètres par an. C'est la vitesse moyenne à laquelle les espèces marines se déplacent vers les pôles pour retrouver un peu de fraîcheur, selon une étude publiée, lundi 25 mai, dans la revue *Nature Ecology & Evolution*. En effet, au fur et à mesure que le climat se réchauffe, les isothermes, ces lignes imaginaires le long desquelles la température est constante, remontent vers des latitudes et des altitudes plus élevées. Le rapport, mené par des chercheurs du CNRS, démontre qu'animaux et végétaux se déplacent en parallèle pour retrouver des milieux plus cléments. Mais, si les animaux marins arrivent à suivre la cadence, sur terre, le retard se creuse. Les espèces terrestres seraient ainsi six fois plus lentes à se déplacer.

Pour arriver à ces résultats, les chercheurs ont analysé la vitesse de déplacement de plus de 12 000 espèces animales et végétales en fonction de celle des températures. *« Un des aspects très intéressants de cette étude vient de sa grande base de données »*, constate Olivier Dangles, directeur de recherche à l'Institut de recherche pour le développement (IRD), qui n'a pas participé aux travaux. Appelée Bioshift, cette base de données en accès libre contient plus de 30 000 observations de déplacement d'espèces issues de 258 études publiées dans des journaux scientifiques et couvrant plus de deux siècles d'histoire.

Les écologues du CNRS ont ainsi observé que les espèces terrestres se déplaçaient seulement à une vitesse moyenne de 1 kilomètre par an. *« Ce sont les activités humaines qui impactent le plus ces migrations*, explique Jonathan Lenoir, chercheur à l'unité écologie et dynamique des systèmes anthropisés du CNRS, et coauteur de l'étude. *La fragmentation des habitats liée à l'urbanisme, la déforestation, le développement des villes, les changements d'usage des sols et le morcellement des forêts, diminuent la capacité des espèces terrestres à migrer. »* À l'inverse, selon le chercheur, les écosystèmes marins sont beaucoup plus continus, permettant aux espèces de se déplacer plus librement et de mieux suivre la course effrénée des températures.

Une autre différence majeure vient du type d'animaux présents dans chaque milieu. *« Nous avons différencié deux types d'espèces : les ectothermes et les endothermes »*, explique Jonathan Lenoir. Les ectothermes sont les animaux ne produisant pas de chaleur interne et qui dépendent des sources extérieures pour augmenter leur température. À l'inverse, les endothermes sont capables de réguler leur propre température. *« Les endothermes vont s'adapter plus facilement à une augmentation de 1 °C de température par exemple. Les ectothermes, plus sensibles aux fluctuations de*

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

température, sont susceptibles de migrer plus vite », poursuit le chercheur. Les milieux marins seraient ainsi majoritairement composés d'espèces ectothermes.

En montagne, la situation est un peu différente. Selon l'étude, les espèces s'y déplacent à une vitesse moyenne de 2 mètres par an, avec un record de 12 mètres par an pour les amphibiens. Cette différence de vitesse entre les plaines et les montagnes serait due au fait que les espèces des plaines doivent parcourir une plus grande distance pour trouver de nouvelles conditions climatiques favorables.

Les espèces s'adaptent donc au changement climatique, mais pourront-elles se déplacer indéfiniment ? *« Non, bien sûr*, répond Olivier Dangles, de l'IRD. *Ces migrations sont en réalité ce qu'on appelle des ascenseurs vers l'extinction. Au bout d'un moment, les animaux ne pourront pas aller plus loin. »* En effet, à mesure que les espèces se déplacent, elles se rapprochent des cimes en altitude et des pôles en latitude. *« L'espace se réduit quand on arrive à proximité du sommet*, confirme Jonathan Lenoir. *Chez certains oiseaux, on observe déjà des espèces endémiques qui ont migré à leur limite altitudinale et qui s'éteignent. »*

« Corridors écologiques »

Alors ces migrations sont-elles une bonne ou une mauvaise nouvelle ? *« Nous pouvons au moins dire que, face au réchauffement, les espèces ont une réponse. Elles mettent en place une stratégie*, avance Romain Bertrand., postdoctorant au laboratoire Évolution et diversité biologique de l'université de Toulouse et coauteur de l'étude. *Mais la vitesse de déplacement des isothermes est beaucoup plus grande que celle des espèces animales ou végétales, donc, quoi qu'il arrive, les animaux ont du retard sur le changement climatique. Et cet écart se creuse de plus en plus pour les espèces terrestres. »*

De plus, selon Olivier Dangles, il existe une contrainte supplémentaire : les espèces sont liées à leur écosystème. *« Par exemple, un insecte va peut-être pouvoir se déplacer rapidement, mais pas sa plante hôte ou sa nourriture. Les espèces dépendent donc de la capacité de dispersion de leurs proies, prédateurs, habitats, etc. »*, explique le chercheur.

Pour aider les espèces à se déplacer plus rapidement, Jonathan Lenoir énonce deux possibilités. *« La première solution, ce sont les migrations assistées. C'est une forme de gestion très interventionniste qui consiste à déplacer des espèces sur de grandes distances pour les relocaliser. »* Cette méthode ne fait pas l'unanimité et peut entraîner des problèmes d'invasion. *« Une approche plus naturelle*, poursuit le chercheur, *consiste à favoriser la mise en place de corridors écologiques, comme des bocages dans les régions agricoles, qui permettent aux animaux de se déplacer tout en restant dans leur écosystème. »*

Pour les scientifiques, le travail n'est pas fini. *« Notre base de données comprend 12 000 espèces, soit 0,6 % de la biodiversité connue*, fait valoir Jonathan Lenoir. *Il reste énormément de régions qui sont très peu échantillonnées, comme l'Amazonie par exemple, qui est pourtant un foyer important de biodiversité. »*

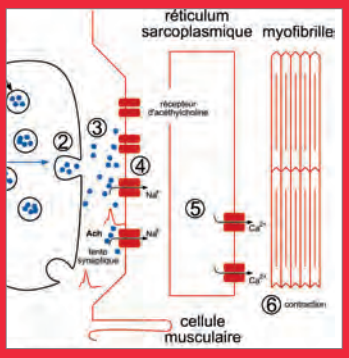
Clémentine Thiberge,
Le Monde daté du 27.05.2020

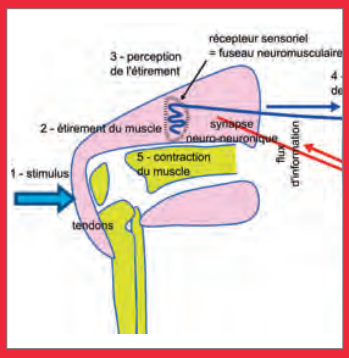
POURQUOI CET ARTICLE ?

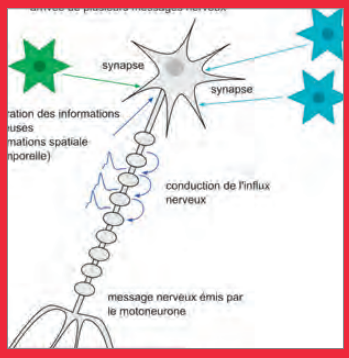
Cet article présente les résultats d'une étude dont l'objectif était de quantifier la vitesse de déplacement des espèces animales marines et terrestres sous l'effet du réchauffement climatique. En effet, les espèces sont caractérisées par des préférences climatiques, et le réchauffement climatique les contraint à se déplacer vers des régions plus froides, c'est-à-dire situées en altitude ou vers de plus hautes latitudes, pour répondre à leurs exigences. L'analyse réalisée s'est basée sur une masse importante de données observationnelles des espèces à partir de plusieurs études. Ainsi, sur les dernières années, les espèces marines se déplacent vers les régions plus froides à la vitesse moyenne de 6 km/an, tandis que les espèces terrestres voyagent à la vitesse moyenne de 1 km/an. Cette différence s'explique principalement par la forte présence des activités humaines en milieu terrestre, qui freine la mobilité des espèces. Ces déplacements peuvent être considérés comme une adaptation du vivant au réchauffement climatique, mais le devenir de ces espèces migrantes est clairement fragilisé.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

COMPORTEMENTS, MOUVEMENT ET SYSTÈME NERVEUX







© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Les réflexes

Maintenir la posture ou réagir rapidement à un stimulus nécessitent un fonctionnement permanent et adapté des muscles extenseurs et fléchisseurs, responsables des mouvements du squelette. Ces mouvements, dont la commande est involontaire, sont des réflexes musculaires. Comment s'effectuent-ils ? Comment leur observation renseigne-t-elle sur l'intégrité du système neuromusculaire ?

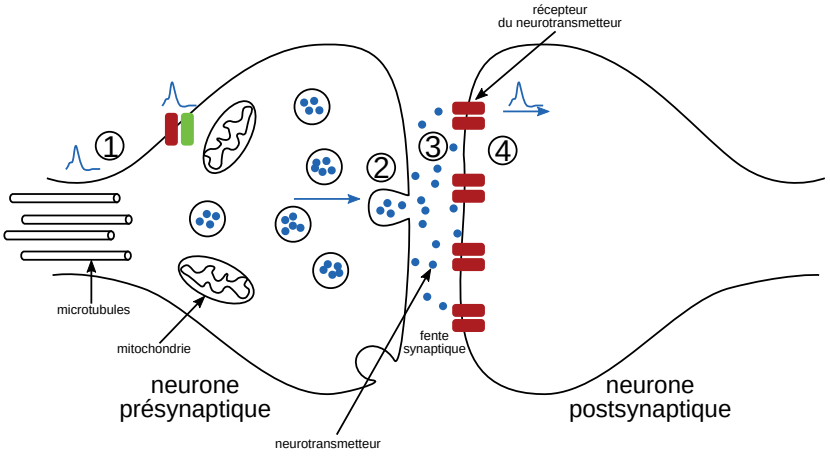
Le test des réflexes

L'examen clinique des réflexes permet de tester le réflexe achilléen (un coup étire le tendon d'Achille, entraînant la flexion du pied) ou le réflexe rotulien (un coup étire le tendon de la rotule, provoquant l'étirement du quadriceps et de la jambe, initialement pliée). Dans les deux cas, les deux muscles antagonistes, situés de part et d'autre du squelette, présentent une activité coordonnée : la contraction de l'un des muscles est associée à l'étirement de l'autre. Ces réflexes, dits réflexes d'étirement, sont rapides et involontaires : il s'agit de **réflexes myotatiques.**

Du muscle à la moelle épinière : le message nerveux sensoriel

Lors d'un réflexe myotatique, le **stimulus** est l'étirement du tendon, qui provoque l'étirement du muscle, perçu par le **fuseau neuromusculaire** constitué de fibres musculaires modifiées. Un message nerveux sensoriel est généré puis véhiculé le long d'un **neurone sensoriel** du nerf rachidien, qui parvient à la **moelle épinière** par sa **racine dorsale** (ou postérieure). Les neurones sensoriels ont leurs corps cellulaires dans les ganglions rachidiens ; leurs extrémités sont en contact avec le corps cellulaire d'un **motoneurone** (ou **neurone moteur**), au niveau de la substance grise de la moelle épinière. Le centre nerveux des réflexes myotatiques est donc situé dans la moelle épinière, et le cerveau n'intervient pas dans leur commande.

Dans le neurone, le message nerveux est de **nature électrique** et consiste en une **succession de potentiels d'action** transmis le long de l'axone d'un neurone. Le potentiel d'action est une inversion transitoire du potentiel membranaire du neurone (tension électrique existant de part et d'autre de la membrane plasmique). Ils sont tous identiques (même durée et même amplitude) et se propagent le long de l'axone du neurone de proche en proche sans s'atténuer. L'intensité du message nerveux est codée en **fréquence de potentiels d'action** : plus le nombre de potentiels d'action véhiculés par le neurone par unité de temps est important, plus l'intensité du message nerveux est élevée.



① Arrivée du message nerveux à l'extrémité du neurone sensoriel.
② Exocytose des vésicules, libérant le neurotransmetteur dans la fente synaptique.
③ Fixation du neurotransmetteur sur ses récepteurs membranaires du neurone postsynaptique.
④ Génération d'un potentiel d'action postsynaptique.

Synapse neuro-neuronique.

NOTIONS-CLÉS

SYSTÈME NERVEUX

Le système nerveux central est constitué du cerveau et de la moelle épinière, tandis que le système nerveux périphérique contient les nerfs reliant la périphérie de l'organisme au système nerveux central.

NEURONE

Cellule nerveuse constituée d'un corps cellulaire (contenant le noyau) et de prolongements, l'axone et les dendrites. Les dendrites reçoivent des messages nerveux, tandis que l'axone conduit le message nerveux vers les terminaisons synaptiques. Le neurone est l'unité de structure et de fonction du système nerveux.

SYNAPSE

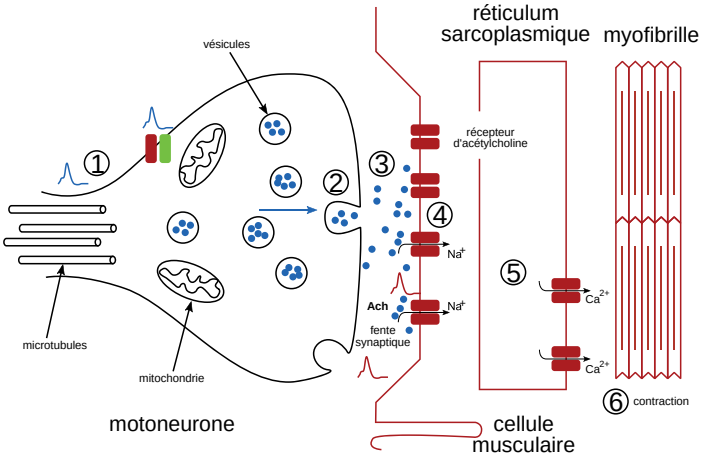
Zone de contact entre l'arborisation terminale d'un neurone et une autre cellule (un neurone, un muscle ou une glande endocrine). L'arrivée d'un message nerveux dans le neurone présynaptique déclenche la libération de neurotransmetteurs qui se fixent sur des récepteurs de la membrane plasmique de l'élément postsynaptique, permettant la transmission du message. L'intensité du message nerveux au niveau de la synapse est codée en concentration de neurotransmetteurs présents dans la fente synaptique.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Dans la substance grise de la moelle épinière, l'extrémité de l'axone du neurone sensoriel est en contact, au niveau d'une **synapse**, avec le corps cellulaire du motoneurone, ce qui constitue le relais synaptique de l'arc réflexe. L'arrivée du message nerveux à l'extrémité du neurone présynaptique déclenche la sécrétion d'un **neurotransmetteur** présent initialement dans des vésicules au niveau de l'extrémité neuronale. Par exocytose, les vésicules fusionnent avec la membrane plasmique du neurone présynaptique et libèrent leurs neurotransmetteurs dans la fente synaptique. Ceux-ci se fixent sur des **récepteurs spécifiques** présents sur la membrane plasmique du neurone postsynaptique (le motoneurone). Cette fixation déclenche la création d'un message nerveux formé de potentiels d'actions se propageant dans le motoneurone. La quantité de neurotransmetteurs libérés dans la synapse est en adéquation avec la fréquence des trains de potentiels d'action du neurone présynaptique. Ainsi, au niveau de la synapse, l'intensité du message nerveux de nature **chimique** est codée en **concentration de neurotransmetteurs**.

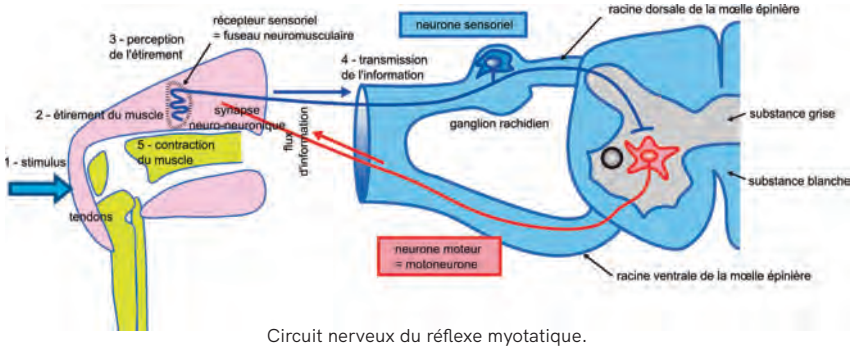
De la moelle épinière au muscle : le message nerveux moteur

Les motoneurones cheminent par les **racines ventrales** des nerfs rachidiens jusqu'aux organes effecteurs, c'est-à-dire les muscles. La zone de contact entre le motoneurone et le muscle est appelée **synapse neuromusculaire**, jonction neuromusculaire ou encore plaque motrice. Au niveau de la synapse neuromusculaire, l'arrivée du message nerveux propagé dans le motoneurone entraîne l'exocytose dans la fente synaptique d'un neurotransmetteur, **l'acétylcholine**. Celle-ci se fixe sur ses récepteurs à la surface de la cellule musculaire. Des cations entrent dans cette cellule et provoque une dépolarisation de sa membrane : un **potentiel d'action musculaire** est alors généré. Celui-ci se propage le long des replis internes de la membrane plasmique musculaire, étroitement associés au réticulum sarcoplasmique, ce qui déclenche l'expulsion des **ions calcium** de ce réticulum. L'augmentation de la concentration en ions calcium agit sur le **cytosquelette** de la cellule musculaire et provoque la **contraction musculaire**.



① Arrivée du message nerveux à l'extrémité du motoneurone.
② Exocytose des vésicules, libérant l'acétylcholine (Ach) dans la fente synaptique.
③ Fixation de l'acétylcholine sur ses récepteurs membranaires de la cellule musculaire.
④ Entrée de cations (principalement Na^+) dans la cellule musculaire, à l'origine d'un potentiel d'action musculaire.
⑤ Propagation du potentiel d'action musculaire, induisant une libération d'ions Ca^{2+} à partir du réticulum sarcoplasmique.
⑥ Déclenchement de la contraction musculaire.

Synapse neuromusculaire.



Circuit nerveux du réflexe myotatique.

Le réflexe myotatique, dont le centre nerveux est localisé dans la moelle épinière, constitue un **arc réflexe monosynaptique,** car il n'existe qu'un seul relais synaptique entre le neurone sensoriel et le motoneurone, dans la substance grise de la moelle épinière. Le test des réflexes myotatiques constitue un outil diagnostic pour tester **l'intégrité du système neuromusculaire**.

ZOOM SUR…

MESSAGE NERVEUX DANS UN NEURONE

Succession de potentiels d'action qui se propagent le long de l'axone des neurones. L'intensité du message nerveux dans le neurone est codée en fréquence de potentiels d'action. La présence de myéline autour des neurones augmente la vitesse de propagation du message nerveux.

NEUROTRANSMETTEUR

Molécule libérée par un neurone au niveau d'une synapse et capable de transmettre le message nerveux à la cellule postsynaptique.

LE POTENTIEL D'ACTION : UNITÉ ÉLÉMENTAIRE DU MESSAGE NERVEUX DANS LES NEURONES

Séquence stéréotypée de la modification du potentiel de membrane d'une cellule excitable, le potentiel d'action est constitué d'une dépolarisation (jusqu'à +30 mV), suivie d'une repolarisation, puis d'une hyperpolarisation transitoire avant le retour à la valeur du potentiel de repos (–70 mV). La durée du potentiel d'action est de quelques millisecondes. Il constitue l'unité élémentaire du message nerveux.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Cerveau et mouvement volontaire

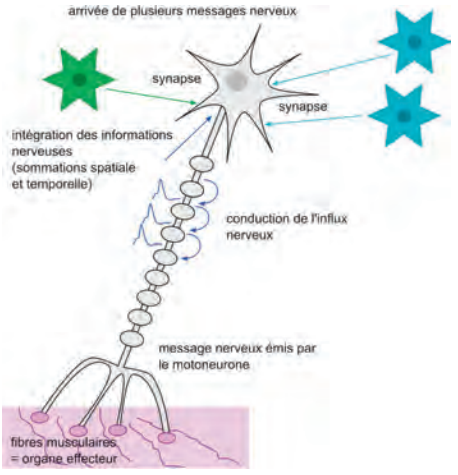
Alors que les réflexes sont des mouvements inconscients, les mouvements volontaires sont contrôlés par le cerveau. Comment s'effectue le contrôle cérébral des mouvements volontaires ? Comment expliquer l'évolution des capacités motrices au cours de la vie ? Comment fonctionne le cerveau ?

La réalisation des mouvements volontaires

Le **cerveau** est le lieu de commande de nombreuses fonctions de l'organisme, dont la motricité volontaire. Il est composé à parts égales de deux types de cellules : les **neurones** et les **cellules gliales**. Les neurones sont spécialisés dans la génération et la transmission du message nerveux, tandis que les cellules gliales assurent le bon fonctionnement de ces neurones. Elles leur servent de support mécanique, assurent leur nutrition, la stabilité du milieu extracellulaire (élimination des déchets, protection contre les pathogènes), ainsi que la production de myéline (lipide entourant certains axones et accélérant la transmission nerveuse). Certaines cellules gliales moduleraient la transmission du message nerveux au sein des réseaux de neurones.

Le **cortex moteur** (ou aire motrice primaire), présent dans chaque hémisphère cérébral, est la partie du cortex commandant directement la motricité volontaire. Chaque région de l'aire motrice primaire commande les mouvements d'une partie précise du corps. Plus la motricité de cette partie corporelle est complexe, plus la région qui lui est dédiée est large. L'aire motrice primaire interagit avec d'autres aires corticales impliquées dans la planification et l'initiation du mouvement, la régulation de la posture, tout en intégrant les informations neurosensorielles reçues.

Les **neurones pyramidaux** projettent leurs axones vers le bulbe rachidien puis vers la **moelle épinière**. Sous le bulbe rachidien, les voies motrices sont croisées : l'aire motrice primaire de l'hémisphère gauche contrôle les mouvements de la partie droite du corps, et inversement. Au niveau de la moelle épinière, les terminaisons des neurones pyramidaux font **synapse** avec les corps cellulaires des motoneurones. En fonction de l'intensité du message nerveux du neurone présynaptique, des **neurotransmetteurs** sont libérés dans la fente synaptique. Leur fixation sur le motoneurone assure la transmission du message nerveux. Le motoneurone est en contact avec de nombreuses synapses, certaines **excitatrices**, d'autres **inhibitrices** ; il intègre l'ensemble des informations nerveuses reçues par **sommation**. Celle-ci peut être **spatiale** (intégration des différents messages nerveux issus de différentes synapses en même temps) ou **temporelle** (intégration des différents messages nerveux issus d'une même synapse sur un certain temps). Le message nerveux résultant est véhiculé par le motoneurone jusqu'au muscle, constitué de plusieurs cellules ou fibres musculaires. Un **motoneurone** innerve plusieurs cellules musculaires, formant une **unité motrice.**



Un motoneurone et ses connexions.

Des dysfonctionnements du système nerveux modifient le comportement moteur et ont des conséquences sur la santé : ce sont, par exemple, les **accidents vasculaires cérébraux** (AVC), les **maladies neurodégénératives** (maladie de Parkinson) ou certaines **infections virales**. Les AVC

NOTIONS-CLÉS

ADDICTION
Comportement répétitif et irrépressible de consommation d'une drogue, dangereuse pour la santé et reconnue comme telle par le consommateur.

DÉPENDANCE
Besoin de consommation d'une drogue, qui se manifeste par un ensemble de troubles physiques et psychiques lors de l'arrêt de la prise de cette drogue.

ACCOUTUMANCE
Diminution des effets d'une drogue après une consommation répétée, entraînant une augmentation des quantités consommées pour obtenir des effets de même intensité.

CIRCUIT CÉRÉBRAL DE LA RÉCOMPENSE
Réseau de neurones cérébraux particuliers, activé lors d'une sensation de plaisir (dans différentes situations : activités sexuelles, recherche de nourriture, réalisation d'activés sportives ou culturelles plaisantes, activités sociales, etc.). Le fait d'éprouver une sensation de plaisir lors d'une action augmente la motivation pour renouveler cette action.

HÉMIPLÉGIE
Paralysie d'un seul côté du corps due à un accident (AVC, traumatisme) affectant le cortex moteur. Du fait du contrôle controlatéral, la paralysie affecte le côté opposé à l'hémisphère cérébral touché.

PARAPLÉGIE ET TÉTRAPLÉGIE
Paralysies affectant les parties gauche et droite du corps, dues à une lésion de la moelle épinière et dont l'étendue dépend de la position de la lésion sur la moelle épinière. Une paraplégie consiste en une paralysie du bassin et des jambes, tandis qu'une tétraplégie est une paralysie des bras, du tronc et des jambes.

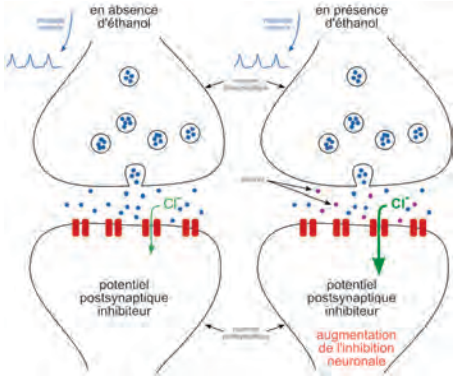
© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

résultent majoritairement d'une diminution de l'apport sanguin au niveau de régions cérébrales. L'arrêt de l'irrigation sanguine d'une partie du cortex moteur entraîne la mort des neurones et l'arrêt du fonctionnement de cette région. L'AVC peut être à l'origine d'une **paralysie** d'une partie du corps d'un seul côté (hémiplégie). Du fait du contrôle controlatéral, la région du corps paralysée est située du côté opposé à l'hémisphère cérébral touché.

Les régions cérébrales contrôlant la motricité présentent des variations individuelles qui dépendent notamment des **apprentissages**. Sous l'action de stimuli externes, des **réorganisations neuronales** se produisent dans le cortex : de nouvelles synapses se forment, puis se renforcent ou régressent. Cette **plasticité cérébrale**, très intense lors de l'enfance, existe tout au long de la vie. Elle explique aussi la capacité de **récupération** du cerveau, après à un AVC, par exemple.

Le cerveau : un organe fragile à préserver

La partie superficielle du cerveau, appelée **cortex cérébral**, est formée par la substance grise, dont les neurones sont en partie dépourvus de myéline. Le cortex cérébral humain, de 5 mm d'épaisseur, présente une surface importante très plissée (2 000 cm^2). Six couches superposées de neurones forment des aires spécialisées dans de nombreuses fonctions : perceptions sensorielles, motricité, fonctions cognitives, etc. Les aires corticales communiquent entre elles par des **voies neuronales** propageant des **potentiels d'action** dont la fréquence d'émission est modulée par des **neurotransmetteurs**. Il s'agit de petites molécules, libérées lors de l'arrivée d'un message nerveux dans la



Action de l'éthanol sur les récepteurs au GABA.

fente synaptique par l'arborisation terminale d'un neurone présynaptique. La quantité de neurotransmetteurs libérée dépend de la **fréquence des potentiels d'action** du neurone présynaptique. Au niveau de la synapse, l'intensité du message nerveux est codée en **concentration de neurotransmetteurs**. La fixation des neurotransmetteurs sur leurs **récepteurs spécifiques** de la membrane du neurone postsynaptique déclenche un **potentiel d'action postsynaptique**. L'amplitude de ce potentiel dépend de la quantité de neurotransmetteurs présents dans la fente synaptique. Les neurotransmetteurs peuvent être **excitateurs** (dopamine, acétylcholine, glutamate et adrénaline) ou **inhibiteurs** (GABA). Le neurone postsynaptique réalise **l'intégration** des messages nerveux reçus, et la transmission synaptique est modulée par de nombreuses substances.

La prise de **substances exogènes** peut perturber la communication nerveuse de l'organisme et provoquer des **comportements addictifs**. Par exemple, **l'éthanol** contenu dans les alcools présente plusieurs effets sur les neurones cérébraux : il se lie à de nombreux récepteurs postsynaptiques, dont les **récepteurs au GABA**, un neurotransmetteur inhibiteur, ce qui entraîne une inhibition prolongée du neurone postsynaptique, et donc une diminution de l'activité neuronale à l'origine de l'effet sédatif de l'alcool.

L'action des substances exogènes sur les synapses est complexe. Certaines ont une structure moléculaire proche des neurotransmetteurs endogènes et se fixent à leur place sur les récepteurs, tandis que d'autres modifient la concentration des neurotransmetteurs endogènes au niveau des synapses, ce qui module leurs effets. De nombreuses substances exogènes perturbent le **circuit cérébral de la récompense**, à l'origine des **addictions**. Le cerveau, dont la très grande majorité des neurones (formés dès la naissance) ne se renouvellent pas, est donc sensible à son environnement et constitue un capital à conserver et à entretenir.

QUATRE ARTICLES DU *MONDE* À CONSULTER

- Un tétraplégique pilote un exosquelette avec son cerveau p. 60 (Alexis Riopel, *Le Monde* daté du 23.05.2018)
- « Recâbler » les nerfs pour déjouer la paralysie p. 61 (Coline Buanic, *Le Monde* daté du 08.07.2019)
- Accidents vasculaires cérébraux : un nouvel espoir de récupération ? p. 63 (Florence Rosier, *Le Monde* daté du 11.04.2018)
- Deux cuites, et une mémoire qui flanche p. 64 (Sandrine Cabut, *Le Monde* daté du 19.08.2015)

ZOOM SUR…

LES EFFETS DU CANNABIS

Le cannabis est une drogue issue de la plante *Cannabis sativa*. Sa consommation entraîne des effets psychotropes dus à des molécules appelées cannabinoïdes, en particulier le tétrahydrocannabinol (THC). Le THC est une molécule psychoactive agissant sur les neurones. Dans le circuit de la récompense, la fixation du THC sur ses récepteurs spécifiques situés à l'extrémité des neurones présynaptiques lève l'inhibition de la transmission du message nerveux au sein du circuit de la récompense. Ceci entraîne une augmentation de la sécrétion de la dopamine à l'origine de la sensation de plaisir. La présence des récepteurs au TCH dans différentes zones du cerveau explique les effets multiples de cette substance exogène psychoactive.

LES CHIFFRES DU CANNABIS EN FRANCE

Le cannabis est la drogue illicite la plus consommée en France et les jeunes Français sont parmi les plus gros consommateurs de cannabis en Europe. En France, 41,5 % des jeunes de 17 ans déclarent avoir déjà fumé au moins du cannabis, et 6,5 % en fumeraient régulièrement (2001). La consommation de cannabis chez les jeunes de 17 ans a connu une progression régulière jusqu'en 2003, date où elle commence à se stabiliser voire à diminuer légèrement. L'usage du cannabis multiplierait par 3 le risque de cancer du poumon, et la conduite après consommation de cannabis multiplie par 1,8 le risque d'être responsable d'un accident mortel de la route.

D'après www.drogues-info-service.fr

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Mécanismes d'un mouvement volontaire, exercice 1

Le sujet (d'après bac S, 2017, Métropole)

Expliquez les mécanismes nerveux aboutissant à un mouvement volontaire, incluant le fonctionnement de la synapse neuromusculaire.
Vous rédigerez un texte argumenté. On attend que l'exposé soit étayé par des expériences, des observations, des exemples, etc.

CE QU'IL NE FAUT PAS FAIRE

- Faire un hors-sujet sur la motricité réflexe ou oublier de faire des schémas.
- Commettre des erreurs sur la problématique : l'essentiel est de délimiter précisément le sujet en lisant attentivement la problématique et en tenant compte, si besoin, des indications supplémentaires fournies par l'énoncé. Deux écueils importants sont à éviter : l'oubli d'une partie du sujet et le hors-sujet. Pour cela, lors de l'élaboration au brouillon de votre plan détaillé, faites des allers-retours réguliers entre l'énoncé et votre plan en cours de construction pour vérifier qu'il répond bien à la problématique. Puis rédigez directement votre développement sur la copie en suivant votre plan détaillé. Selon vos préférences, il est possible de rédiger l'introduction et la conclusion au brouillon, ou de les rédiger directement sur votre copie.

LA BONNE MÉTHODE

Élaborer un plan détaillé au brouillon
La meilleure méthode pour élaborer les réponses aux exercices 1 et 2 est de construire un plan détaillé de ces réponses au brouillon. En effet, la durée de l'épreuve est trop courte pour vous permettre de rédiger au brouillon la réponse, puis de la recopier sur votre copie ; de toute manière, la réalisation d'un plan détaillé est la méthode la plus efficace pour construire une réponse structurée et répondant à la problématique. Après avoir bien identifié la problématique présentée par l'énoncé, vous pouvez noter au brouillon toutes les notions qui se rapportent au sujet (exercice 1) ou analyser les documents dans l'ordre de l'énoncé, soit au brouillon, soit directement sur l'énoncé (exercice 2). Puis, en prenant le temps de la réflexion, construisez votre plan détaillé au brouillon en structurant le développement en différentes parties et sous-parties. Prévoyez l'intégration des différents arguments (observations et expériences dans l'exercice 1, et informations extraites des documents dans l'exercice 2), ainsi que la position des schémas, tableaux ou graphiques. Une fois votre plan détaillé fini, essayez d'avoir une vue d'ensemble de celui-ci pour vérifier qu'il répond bien à la problématique par une argumentation ou une démarche de résolution de problème cohérentes et rigoureuses. N'hésitez pas à consacrer le temps nécessaire à la construction de ce plan, qui constitue un temps de réflexion indispensable, garant de la qualité de votre réponse.

Structurer sa réponse sur la copie
Pensez à aider l'évaluateur à se repérer facilement dans votre copie, en indiquant clairement les numéros et les titres des exercices traités. Aérez votre copie en sautant des lignes entre l'introduction, le développement et la conclusion de chaque exercice, ainsi qu'entre les grandes parties du développement. Organisez votre texte en différents paragraphes, chaque paragraphe traitant une grande idée. Sans que cela soit obligatoire, les grandes parties du développement des réponses des exercices 1 et 2 peuvent être annoncées par des titres significatifs. Ces titres peuvent être numérotés et/ou mis en valeur (soulignés ou en couleur) pour aider l'évaluateur à les repérer et à appréhender la structure de votre réponse.

Le corrigé

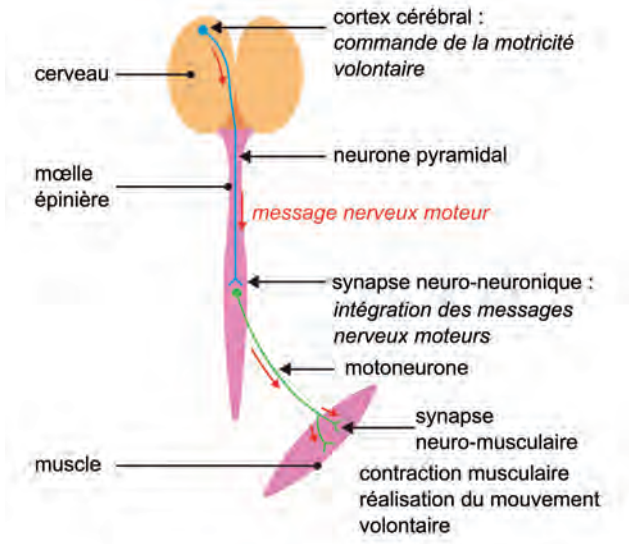
Nous faisons constamment des mouvements volontaires, comme saisir un objet, marcher, ou écrire, etc. Une fois la décision prise de faire un mouvement, sa réalisation par les muscles paraît instantanée. En effet, le système nerveux, système de communication rapide au sein de l'organisme, est responsable de transmettre l'information motrice du cerveau vers les muscles effecteurs. Quels sont les mécanismes nerveux aboutissant à un mouvement volontaire ? Quel est le fonctionnement de la synapse neuromusculaire ? Nous décrirons d'abord les mécanismes nerveux de la motricité volontaire, en détaillant le trajet des voies nerveuses motrices partant du cerveau, et en précisant la nature du message nerveux, puis nous exposerons la structure et fonctionnement de la synapse neuromusculaire.

I. Les mécanismes nerveux de la motricité volontaire

L'étude de cas cliniques, comme les blessures au niveau du cerveau et l'exploration du cortex cérébral par les techniques d'imagerie médicale montrent que la commande des mouvements volontaires est localisée dans le cortex cérébral, zone de faible épaisseur située à la surface du cerveau. Plusieurs aires cérébrales formant le cortex moteur coopèrent dans la commande de la motricité volontaire. L'intention du mouvement s'élabore dans le cortex pariétal, puis la commande du mouvement est préparée par l'aire prémotrice et l'aire motrice supplémentaire. L'aire motrice primaire commande alors le mouvement volontaire. Chaque région de l'aire motrice primaire commande une région précise du corps. Plus la motricité d'une région corporelle est complexe, plus la région de l'aire motrice primaire qui lui est dédiée est développée.

Issus de l'aire motrice primaire, les faisceaux de neurones pyramidaux projettent leurs axones vers le bulbe rachidien puis dans la moelle épinière. Au niveau du bulbe rachidien, les voies nerveuses motrices sont croisées : l'aire motrice primaire de l'hémisphère gauche contrôle les mouvements de la partie droite du corps, et réciproquement. Puis, dans la moelle épinière, les terminaisons synaptiques des neurones pyramidaux entrent en contact, par l'intermédiaire d'une synapse, avec les corps cellulaires des motoneurones

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.



La commande de la motricité volontaire : du cortex cérébral au muscle.

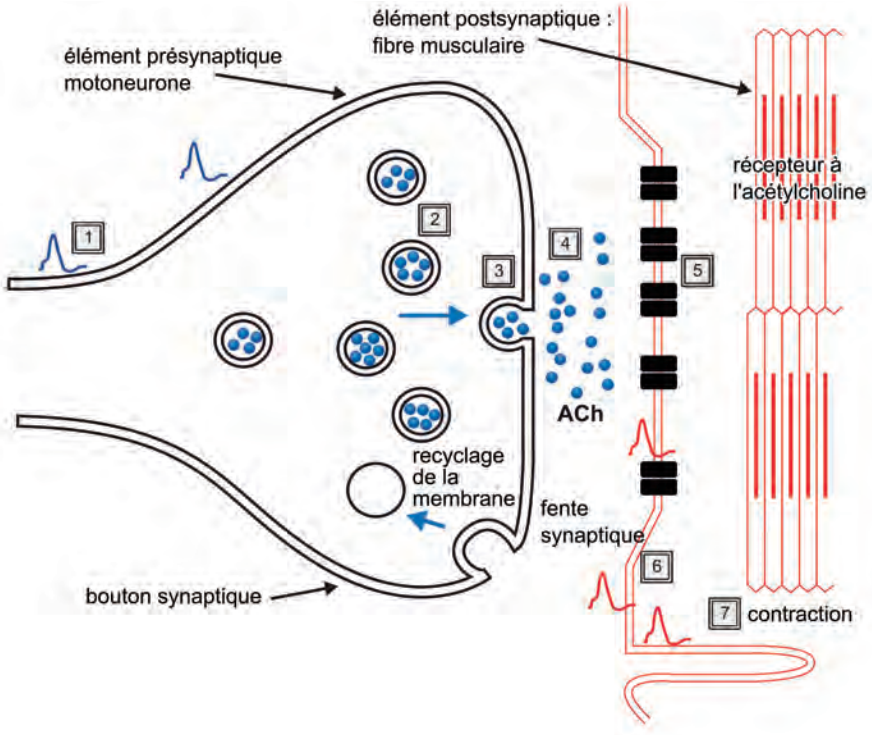
ou neurones moteurs. Au niveau de cette synapse, l'arrivée du message nerveux moteur à l'extrémité du neurone présynaptique entraîne la libération de neurotransmetteurs, qui se fixent sur des récepteurs spécifiques de la membrane du motoneurone, en adéquation avec la nature excitatrice ou inhibitrice des messages nerveux moteurs arrivant. En effet, le corps cellulaire du motoneurone est connecté avec plusieurs synapses et intègre l'ensemble des informations nerveuses reçues par sommation spatiale (intégration des messages nerveux issus de différentes synapses en même temps) et temporelle (intégration des messages nerveux issus d'une même synapse sur un certain temps). Dans le motoneurone se forme un message nerveux moteur unique, véhiculé par l'axone, du motoneurone jusqu'au muscle. Au niveau du muscle, constitué de plusieurs cellules ou fibres musculaires, un même motoneurone innerve plusieurs fibres musculaires, mais une fibre musculaire ne reçoit l'information que d'un seul motoneurone.

Les cellules de l'organisme sont caractérisées par un potentiel membranaire de repos, dont la valeur est –70 mV. Dans les neurones, cette valeur du potentiel membranaire peut être modifiée. Une stimulation suffisante du neurone entraîne une inversion transitoire de ce potentiel, ce qui constitue un potentiel d'action. Il est toujours identique, avec la même durée (2 ms environ) et la même amplitude. Il se propage le long de l'axone du neurone, de proche en proche, sans s'atténuer. Le message nerveux moteur consiste en une succession de potentiels d'action transmis le long de l'axone des neurones. Le message nerveux moteur est donc un message de nature électrique, dont l'intensité est codée en fréquence de potentiels d'action. Plus le nombre de potentiels d'action véhiculés par le neurone par unité de temps est élevé, plus l'intensité du message nerveux est forte. Comment fonctionne la synapse neuromusculaire, située entre le bouton synaptique du motoneurone et la fibre musculaire ?

II. Du motoneurone à la cellule musculaire : la synapse neuromusculaire

La synapse neuromusculaire est la zone de contact entre le motoneurone et le muscle. Le long de l'axone du motoneurone, le message nerveux moteur est véhiculé sous forme de trains de potentiels d'action. Arrivé à l'extrémité présynaptique du motoneurone, le message nerveux moteur déclenche l'exocytose de vésicules contenant un neurotransmetteur, l'acétylcholine. L'acétylcholine présente dans la fente synaptique se fixe sur ses récepteurs spécifiques de la membrane plasmique de la fibre musculaire, déclenchant un potentiel d'action musculaire qui entraîne la contraction de la fibre. Ainsi, au niveau de la synapse neuromusculaire, le message nerveux moteur du motoneurone est traduit en un message nerveux de nature chimique, dont l'intensité est codée en concentration de neuromédiateurs présents dans la fente synaptique et déclenchant la contraction musculaire.

Ainsi, la commande de la motricité volontaire se fait par voie nerveuse. Partant du cortex moteur, des neurones pyramidaux acheminent le message nerveux moteur dans la moelle épinière. Au niveau de la substance grise, le message nerveux moteur est transmis par l'intermédiaire d'une synapse à un motoneurone. Après intégration, le motoneurone transmet un message moteur unique jusqu'au muscle. Au niveau de la synapse neuromusculaire, le message nerveux moteur entraîne la libération de neurotransmetteurs, dont la fixation sur leurs récepteurs déclenche la contraction musculaire. Quels mécanismes sont-ils responsables de la contraction des fibres musculaires ?



La synapse neuromusculaire.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Un tétraplégique pilote un exosquelette avec son cerveau

Neurosciences – Au cœur du polygone scientifique de Grenoble, des chercheurs ont implanté une puce dans la tête d'une personne handicapée afin qu'elle commande une armure mécanique par la pensée. Un dispositif « bras et jambes » inédit

Grenoble

Prisonniers de leur tête, les tétraplégiques ont perdu toute prise sur le monde physique. Ils peuvent bien sûr le percevoir, mais sont condamnés à l'immobilité, hormis pour les quelques muscles de leur visage et de leur cou qui réagissent encore. Pourtant, quand ils s'imaginent marcher, lever un bras ou plier les doigts, les mêmes signaux électriques enflamment leur cortex moteur qu'avant la rupture de leur moelle épinière. *« Leur cerveau parle, mais personne n'écoute »*, remarque le neurochirurgien Alim-Louis Benabid.

Avec le projet BCI (pour *brain computer interface*), l'équipe du professeur Benabid prend avantage de cette activité cérébrale qui n'arrive pas à quitter l'esprit des tétraplégiques. Les chercheurs ont développé un dispositif la traduisant en commandes pour un exosquelette, une sorte d'enveloppe mécanique dans laquelle la personne handicapée est embarquée. Ainsi, ses bras et ses jambes sortent de la torpeur, son système vasculaire s'active et elle retrouve enfin un peu de liberté de mouvement. Le système est testé depuis un an chez un tétraplégique, et l'équipe soumettra bientôt ses résultats à une revue scientifique.

Le professeur Benabid mène ce projet chez Clinatec, un centre de recherche biomédicale rattaché au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), au CHU de Grenoble-Alpes, à l'Inserm et à l'université Grenoble-Alpes. Là-bas, au cœur du polygone scientifique de Grenoble, on s'efforce de développer des technologies médicales qui aident les patients par d'autres voies que la médication.

Sur le marché, on trouve déjà des exosquelettes pour les paraplégiques contrôlés par l'inclinaison du buste ou grâce à une manette. D'ailleurs, la distribution du premier appareil du genre en France (ReWalk) vient tout juste de débuter. Toutefois, le projet d'un exosquelette « bras et jambes » dirigé par la pensée est d'une tout autre ampleur.

Ouvrant les portes de son laboratoire, le professeur Benabid – qui est par ailleurs un pionnier de la stimulation cérébrale profonde, employée notamment contre la maladie de Parkinson – demeure toutefois avare de détails tant que les résultats ne seront pas publiés. S'il refuse notamment de présenter les prouesses du patient aux médias, il peine néanmoins à contenir son enthousiasme. *« On a avancé beaucoup plus rapidement que je ne croyais*, confie-t-il. *Honnêtement, je pensais qu'il nous faudrait des années pour en arriver là. »*

L'équipe française n'est pas la première à faire le pont entre le cerveau et l'exosquelette, mais aucun autre groupe de recherche n'avait encore tenté l'expérience avec un implant placé directement au contact du cerveau. Ce choix, très invasif, comporte en contrepartie d'importants avantages. Contrairement aux casques d'électro-encéphalographie (EEG) utilisés par des chercheurs suisses et américains dans des projets semblables, les implants ne bougent absolument pas et assurent une mesure fidèle de l'activité cérébrale. De plus, le signal n'est pas atténué par le crâne, ce qui améliore la lecture.

« Algorithme adaptatif »

Les ingénieurs, mathématiciens, médecins, informaticiens et roboticiens de Clinatec ont développé eux-mêmes un capteur EEG implantable directement sur la dure-mère, l'enveloppe fibreuse du cerveau. D'un diamètre de 5 cm et d'une épaisseur de 12 mm, la puce est insérée dans une ouverture ronde de même diamètre pratiquée dans le crâne. On replace ensuite la peau sur l'implant. Après l'opération, aucun câble ne traverse le cuir chevelu : la puce transmet les données qu'elle récolte grâce à une antenne et se recharge en électricité par induction magnétique à travers la peau. Conservant l'intégrité de la peau, la méthode minimise aussi les risques d'infection pour le patient.

Tenant la puce au creux de sa main, Guillaume Charvet paraît fier du travail accompli. L'ingénieur explique comment l'information recueillie par les 64 électrodes ultrasensibles est analysée en moins de 350 millisecondes par un ordinateur intégré à l'exosquelette. *« Nous utilisons un algorithme adaptatif. Lors d'une phase de calibration, le patient doit effectuer une série de tâches définies. Grâce à l'apprentissage profond, le programme associe l'activité cérébrale à chacun de ses mouvements. Par la suite, l'algorithme peut reconnaître n'importe quel mouvement. »*

Au rez-de-chaussée de Clinatec, on retrouve le massif exosquelette. D'un blanc étincelant, ses quatre membres artificiels sont munis de courroies afin de maintenir le passager en place. L'armure de 60 kg supporte son propre poids en plus de celui de l'utilisateur. Les membres supérieurs de l'exosquelette pivotent selon quatre axes, tandis que les membres inférieurs disposent de trois degrés de liberté. La démarche de l'exosquelette, encore claudicante, devrait s'améliorer dans le futur, tout comme son équilibre. Pour l'instant, des câbles au plafond préviennent les chutes.

L'exosquelette est équipé de 14 moteurs électriques qui roulent et déroulent des câbles métalliques afin de mettre les articulations en mouvement. Ce mécanisme,

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

développé par le CEA, découle d'une expérience de plusieurs décennies dans la robotique, d'abord entreprise pour la manipulation de matériel radioactif. L'exosquelette de Clinatec est l'œuvre du CEA List, un laboratoire consacré aux systèmes numériques intelligents basé à Saclay (Essonne).

Implication cruciale du sujet

Le 21 juin 2017, le professeur Benabid implantait deux puces (une de chaque côté de la tête) chez un premier sujet. Peu de temps après, le tétraplégique faisait ses premiers pas. *« Je me sens comme Armstrong la première fois qu'il a mis le pied sur la Lune »*, aurait-il déclaré. Depuis lors, ce premier cobaye s'entraîne avec zèle afin d'apprivoiser la machine. Il vient cinq jours par mois à la clinique et enfile l'exosquelette pendant deux heures. Après la séance d'entraînement, il est exténué, explique Stéphane Pezzani, cadre de santé du secteur sujet-patient chez Clinatec. Ce dernier travaille de près avec le sujet et souligne son implication cruciale dans la recherche. *« Il voit son rôle comme celui d'un partenaire ; c'est devenu son métier »*, note-t-il.

En plus de ses visites à Grenoble, le sujet s'entraîne aussi à la maison. Des informaticiens du centre ont conçu un jeu vidéo spécialement pour lui. Grâce à ses pensées, il dirige un avatar dans un environnement virtuel, exactement de la même manière qu'il pilote l'exosquelette à la clinique.

Clinatec dispose actuellement d'une autorisation pour implanter les puces chez cinq sujets afin de montrer que la procédure est sans danger. Jusqu'à maintenant, deux personnes ont subi l'opération. Cependant, l'implantation a connu des problèmes chez un patient, et ses puces ont été retirées. Trois autres tétraplégiques devraient passer sous le bistouri dans les prochains mois.

Dans le futur, l'équipe espère procéder à des tests chez un plus grand nombre de personnes. Toutefois, le professeur Benabid refuse catégoriquement de réduire le temps d'accès à la machine du premier sujet. Quand on redonne un espoir d'indépendance à quelqu'un, on ne le reprend pas, croit-il.

Alexis Riopel, *Le Monde*
daté du 23.05.2018

POURQUOI CET ARTICLE ?

La paraplégie (paralysie des membres inférieurs) et la tétraplégie (paralysie des membres inférieurs et supérieurs), dues à des lésions de la moelle épinière, concernent en France environ 50 000 personnes plutôt jeunes. **Cet article fait le point sur les avancées d'une équipe française qui travaille à la mise au point d'un exosquelette, commandé par le patient grâce à un implant crânien.** En effet, chez un individu tétraplégique, le cortex moteur reste fonctionnel, mais les lésions médullaires empêchent les messages nerveux moteurs de parvenir aux muscles. La présence d'un implant, s'il nécessite une opération pour sa mise en place dans le cerveau, permet au patient (après un apprentissage) de commander sans fil les mouvements de l'exosquelette. Celui-ci constitue une armure métallique et motorisée donnant la possibilité à l'individu paralysé de retrouver une certaine mobilité. Ces recherches originales, notamment la commande de l'exosquelette par un implant crânien, ouvrent la perspective de refaire des mouvements devenus impossibles. Des progrès sont encore nécessaires pour que les exosquelettes soient utilisés dans la vie courante, en dehors des seuls laboratoires de recherche.

« Recâbler » les nerfs pour déjouer la paralysie

En Australie, treize tétraplégiques ont pu à nouveau utiliser leurs bras grâce à la récente technique de transfert de nerfs.

Tétraplégie n'est pas toujours synonyme de paralysie totale des quatre membres. Certains muscles des bras restent fonctionnels si la lésion de la moelle épinière se situe suffisamment bas, permettant le recours à la chirurgie réparatrice. Treize Australiens tétraplégiques ont ainsi retrouvé l'usage partiel de leurs membres supérieurs à la suite de transferts de nerfs, au cours d'une étude décrite jeudi 4 juillet dans la revue *The Lancet*. Après vingt-quatre mois de rééducation intensive, les chercheurs ont mesuré une *« amélioration significative »* de la force et de l'agilité des mains des patients.

Les opérations visaient à restaurer l'extension du coude, l'ouverture de la main et la saisie d'objets, par un geste de « pince » pouce-index et à pleine main. Des mouvements simples intégrés au quotidien – pour se redresser d'une position couchée, saisir un verre ou tenir un stylo –, au point d'oublier les complexes rouages physiologiques à l'œuvre et l'autonomie qu'ils confèrent.

Les patients tétraplégiques jugent d'ailleurs le rétablissement de l'usage de leurs mains prioritaire pour leur qualité de vie, devant le contrôle intestinal et vésiculaire ou la fonction sexuelle. L'extension du coude importe d'autant plus aux personnes paralysées qu'elle est sollicitée lors de la propulsion en fauteuil roulant et du transfert de position, par exemple du fauteuil au lit.

Seize participants atteints de lésions récentes de la moelle épinière ont été recrutés pour cette étude, en majorité

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

des hommes jeunes (77 % d'hommes, 27 ans de moyenne d'âge). Les accidents de la route constituaient la première cause de blessure, suivis du sport. Moins de dix-huit mois après les traumatismes, cinquante-neuf transferts de nerfs ont été pratiqués sur l'ensemble des patients. Les chirurgiens ont sectionné des nerfs de muscles encore mobiles situés au-dessus de la lésion, pour les greffer aux nerfs « receveurs » non fonctionnels de muscles paralysés, à l'inverse reliés à la moelle épinière au-dessous de la blessure.

Pas de révolution

Délaissée depuis 1965, l'application de cette technique aux lésions de la moelle épinière a regagné l'attention des chercheurs au cours de la dernière décennie. La pratique reste cependant l'apanage d'un cercle restreint de scientifiques, parmi lesquels Natasha van Zyl, auteure principale de l'étude et chirurgienne à Melbourne.

« Ce ne sont pas des travaux révolutionnaires, tempère Caroline Leclercq, de l'Institut de la main de Paris. *Le transfert nerveux est une technique récente, mais le même principe est utilisé avec des unités musculotendineuses chez des patients tétraplégiques depuis quarante-cinq ans. »* La chirurgienne de la main procède elle-même à des transferts de tendons *« depuis une trentaine d'années »*. La procédure consiste à détacher de leur site d'insert un muscle « donneur » innervé au-dessus de la blessure et son tendon, puis à les rattacher au niveau d'un autre site de façon à remplacer la fonction d'un muscle paralysé.

« L'intérêt de l'étude se trouve dans la combinaison de ces deux techniques », assure Caroline Leclercq. Dix patients ont bénéficié à la fois de transferts de nerfs et de tendons. De quoi comparer approche nouvelle et approche traditionnelle. D'après les auteurs, l'opération des nerfs a conduit à une amélioration fonctionnelle *« similaire »* à celle du transfert de tendons, avec une incision plus courte et une immobilisation postopératoire réduite.

Allier force et dextérité

En cas de conditions cliniques favorables, les deux types d'opérations ont même été réalisées sur des mains distinctes. Résultat : du côté du transfert tendineux, une main plus forte, utile pour soulever des objets lourds et, de l'autre, une main plus habile, adaptée aux mouvements fins à la suite du transfert nerveux. *« Les participants apprécient leurs deux mains pour des raisons différentes, et n'échangeraient pas ces fonctions contre une mobilité symétrique de leurs mains »*, rapportent Natasha van Zyl et ses collègues.

Les points forts et les faiblesses propres à chaque technique influent aussi sur les conditions mêmes de l'acte chirurgical. Lors du transfert nerveux, un nerf unique peut réinnerver plusieurs muscles à la fois. Un avantage indéniable en cas de lésion haute de la moelle épinière, laissant peu de nerfs ou de muscles donneurs disponibles. La plasticité cérébrale permet alors à la fonction motrice de s'améliorer petit à petit à la suite de l'opération, tandis que le tendon transféré peut s'endommager avec le temps. De fait, les opérations des nerfs imposent une rééducation intensive sur le long terme. Le patient peut mettre des mois à esquisser un premier geste, et des années avant d'atteindre la capacité maximale de ses membres rétablis.

La procédure peut également déboucher sur un échec, comme pour quatre transferts de nerfs effectués chez trois participants de l'étude. *« Aujourd'hui plus aléatoire »* que la chirurgie traditionnelle de transfert de tendons, la technique « peut faire peur aux praticiens », estime Caroline Leclercq. Reste à déterminer l'approche la plus efficace des deux et les conditions de son succès lors d'études de plus grande ampleur.

D'ici là, la chirurgienne française prône une association des transferts nerveux et tendineux, *« l'avenir »*, selon elle. *« En aucun cas on ne doit abandonner la technique traditionnelle (…). Le transfert de nerfs ne représente qu'un outil de plus pour la même boîte à outils. »*

Les nouveaux blessés médullaires seraient environ un millier par an en France, dont 400 tétraplégiques. Parmi eux, seuls quelques dizaines auraient recours au transfert de tendons. Les approches technologiques progressent en parallèle, du contrôle du bras grâce à l'implantation de puces dans le cerveau à, plus récemment, l'utilisation non invasive d'électrodes et d'électroencéphalogrammes.

Coline Buanic, *Le Monde*
daté du 08.07.2019

POURQUOI CET ARTICLE ?

Cet article fait le point sur une méthode développée par une équipe médicale en Australie pour redonner de la mobilité aux membres supérieurs d'individus tétraplégiques, c'est-à-dire en leur permettant d'effectuer des mouvements simples, mais indispensables à leur quotidien.
Cette méthode de chirurgie réparatrice repose sur le transfert de nerfs (initialement présents sur des muscles intacts) à des muscles paralysés et donc situés sous la lésion de la moelle épinière. Ce transfert doit s'accompagner d'une rééducation intense pour qu'il soit efficace et fait donc intervenir la plasticité cérébrale du patient. En fait, ce type de technique chirurgicale est déjà utilisée depuis plusieurs années, mais dans le cadre de transferts de tendons. L'étude réalisée en Australie permet de présenter les avantages distinctifs du transfert de nerfs et du transfert de tendons au niveau des membres supérieurs des individus tétraplégiques. Chacune des techniques, qui concernent pour l'instant un nombre réduit de patients, présente des résultats intéressants et qui pourraient être complémentaires dans la récupération d'une mobilité partielle des membres supérieurs des individus tétraplégiques.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Accidents vasculaires cérébraux : un nouvel espoir de récupération ?

Neurologie – Chez la souris et le singe, une molécule, également en cours d'évaluation dans Alzheimer, semble renforcer les capacités du cerveau lésé à récupérer après une lésion

Comment, après un accident vasculaire cérébral (AVC), favoriser la récupération du cerveau lésé ? L'enjeu n'est pas mince : chaque année en France, 150 000 personnes sont frappées par cette *« foudre cérébrale »*. Une sur deux en gardera un handicap neurologique plus ou moins sévère. Au total, plus de 500 000 hommes et femmes vivent avec des séquelles d'AVC en France.

Une étude publiée dans *Science*, le 6 avril, livre une piste inédite. Chez la souris et le singe, l'administration orale d'une petite molécule, l'*edonerpic maleate*, dans les jours et semaines qui suivent un accident cérébral, semble favoriser la récupération motrice – à condition d'être couplée à une rééducation. *« C'est un signal encourageant, inhabituel dans ce type d'expérience »*, commente prudemment le professeur Eric Jouvent, neurologue à l'hôpital Lariboisière (AP-HP, Paris). *« C'est évidemment intéressant, mais on est encore loin des essais cliniques »*, juge de son côté le professeur Alain Yelnik, chef du service de médecine physique et de réadaptation de l'hôpital Fernand-Widal.

Interventions en urgence

Depuis vingt ans, de remarquables progrès ont été accomplis dans la prise en charge de la phase aiguë de l'AVC ischémique – qui résulte de l'occlusion d'une artère irriguant le cerveau. Le but est de déboucher rapidement l'artère occluse. La stratégie de référence est la thrombolyse intraveineuse, développée à la fin des années 1990 : elle consiste à dissoudre biochimiquement le caillot coupable – un « Destop » sur nos artères, en somme. La seconde stratégie, la thrombectomie, a vu son efficacité démontrée en 2015 : c'est la méthode du « tire-bouchon », une extraction mécanique du caillot.

Malgré leur efficacité spectaculaire, ces interventions doivent être réalisées le plus tôt possible, dans les premières heures après l'accident. Autre limite : *« Ces deux interventions ne concernent que 10 % à 20 % des patients, ceux qui ont une occlusion artérielle visible à l'imagerie »*, souligne Eric Jouvent.

Il fallait donc explorer d'autres voies. Depuis quelques décennies, la neuroprotection est une piste très étudiée. L'enjeu : limiter la zone de tissu cérébral lésé. Car, autour du tissu détruit par l'AVC, se développe une zone de « pénombre » : un tissu en souffrance, à la fonction altérée mais aux lésions encore réversibles, à condition d'agir vite. Une multitude de molécules ont été évaluées : *« Quantité d'études positives chez l'animal se sont révélées négatives chez l'homme »*, se désole Eric Jouvent. L'enthousiasme est donc retombé.

La nouvelle étude dans *Science*, menée par des équipes japonaises, concerne la période qui suit directement la phase aiguë de l'AVC. Le but : favoriser la *« plasticité neuronale »*. Il s'agit de recâbler les neurones pour aider le cerveau à restaurer ses fonctions altérées – à compenser ses déficits moteurs, verbaux, cognitifs…

Hiroki Abe et ses collègues de l'université de Yokohama ont d'abord évalué les effets de ce produit, l'*edonerpic maleate*, sur les neurones du cortex de la souris. Verdict : ce composé, administré tous les jours dans l'eau de boisson, augmente l'excitabilité des cellules nerveuses. Il accroît la transmission entre neurones à travers un type de récepteurs au glutamate, principale molécule excitatrice (« neurotransmetteur excitateur ») qui véhicule le signal électrique à travers les réseaux de neurones.

Récupération de la motricité

Ensuite, les chercheurs ont testé l'effet de ce produit chez des souris ayant subi une lésion locale du cortex moteur. Résultat : son administration orale, par rapport à un placebo, améliorait la capacité des rongeurs à attraper des granules de nourriture – à condition d'être couplée à un réentraînement.

Plus intéressant : les auteurs ont évalué son impact chez six singes macaques (trois traités, trois contrôles) ayant subi un AVC d'une région-clé du cerveau, la « capsule interne », un accident qui entraîne des troubles moteurs sévères, notamment une paralysie de la main. Résultat : dans ce modèle plus proche de l'homme, l'administration orale du composé permettait aux singes une récupération meilleure de la motricité fine de la main pour saisir une friandise à travers une grille. Les vidéos montrent ces différences entre singes traités ou non, assez spectaculaires. Là encore, les progrès ne sont sensibles que lorsque l'animal était réentraîné.

« C'est une très jolie étude car elle décline une analyse complète, des neurones aux comportements de la souris et du singe. Elle décrypte aussi les mécanismes moléculaires en jeu », estime le docteur Olivier Detante, neurologue au CHU de Grenoble, qui s'intéresse à une autre stratégie : la réparation du cerveau lésé par des injections de cellules souches.

Connu pour son action neurotrophique, la molécule *edonerpic maleate* est déjà évaluée dans la maladie d'Alzheimer par la société Toyama Chemical. Sans efficacité probante à ce jour – mais sans toxicité apparente. Les résultats seront-ils plus heureux pour limiter les dégâts liés aux AVC ? Il faudra confirmer ce résultat chez l'animal avant de se fier au verdict du « juge de paix », l'évaluation chez l'homme.

Florence Rosier, *Le Monde*
daté du 11.04.2018

POURQUOI CET ARTICLE ?

Les AVC ou accidents vasculaires cérébraux touchent plus de 150 000 personnes chaque année en France et sont majoritairement dus à l'occlusion d'un vaisseau sanguin dans le cerveau. **Cet article montre l'importance des AVC dans la population et présente les perspectives thérapeutiques actuelles.**

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Deux cuites, et une mémoire qui flanche

Chez des rats adolescents, deux épisodes rapprochés de « binge drinking » suffisent à compromettre l'apprentissage et la mémorisation

Alors que le phénomène des bitures express (*« binge drinking »*) s'intensifie en Europe et notamment en France, c'est un résultat inquiétant que livre l'équipe des professeurs Olivier Pierrefiche et Mickaël Naassila (Inserm, groupe de recherche sur l'alcool et les pharmacodépendances, université de Picardie). Chez des rats adolescents, deux épisodes rapprochés de *binge drinking* suffisent à perturber durablement les processus d'apprentissage et de mémorisation, concluent leurs travaux, parus le 6 août dans la revue International *Journal of Neuropsychopharmacology*.

Cette étude s'intègre dans le projet européen AlcoBinge, qui réunit des chercheurs français et britanniques pour explorer la thématique du *binge drinking* dans une population étudiante et avec des modèles animaux.

En quelques années, le sujet est devenu une affaire de santé publique. En France, parmi les 18-25 ans, la proportion de personnes ayant connu une ivresse dans l'année est passée de 33 % à 46 %, entre 2005 et 2014, selon le baromètre santé de l'Institut national de prévention et d'éducation pour la santé (Inpes).

« Quand nous venons parler des méfaits de l'alcool en milieu scolaire, les jeunes nous rétorquent souvent qu'une cuite par-ci par-là, ce n'est pas dangereux. D'où l'idée de déterminer quels sont les seuils, en fréquence et en dose, qui peuvent induire des troubles de la mémoire », raconte Mickaël Naassila. Une recherche d'autant plus justifiée qu'un épisode de black-out total n'est pas exceptionnel dans les jours qui suivent un *binge drinking*. *« Selon une de nos enquêtes effectuées auprès d'étudiants en médecine, environ un sur deux reconnaît avoir eu des pertes de mémoire après une alcoolisation aiguë »*, ajoute le spécialiste.

Les chercheurs d'Amiens ont sélectionné des rats âgés d'une cinquantaine de jours, l'adolescence s'étalant, chez ces rongeurs, du 30e au 60e jour de vie. Une forte dose d'éthanol leur a été injectée pour provoquer une ascension rapide de l'alcoolémie jusqu'à environ 2 g/l, niveau auquel les jeunes humains se retrouvent volontiers aux urgences.

Plasticité synaptique

L'administration de cette dose a été répétée neuf heures plus tard chez une partie d'entre eux pour reproduire une deuxième ivresse aiguë, proche dans le temps. Dans les 48 heures suivantes, Mickaël Naassila et ses collègues ont évalué les fonctions d'apprentissage avec un test « de reconnaissance » d'un nouvel objet. Ils ont aussi exploré le mécanisme à la base de la mémorisation : la plasticité synaptique. Pour cela, ils ont mesuré, sur des tranches de cerveau, l'activité électrique au niveau de l'hippocampe, une zone cérébrale impliquée dans les processus de mémorisation.

Les résultats sont sans appel. Après une ivresse, la plasticité synaptique des rats est conservée. Mais deux alcoolisations rapprochées entraînent une nette perturbation de la mémorisation pendant 48 heures, avec un retour vers la normale au 8e jour. La plasticité synaptique est également altérée. *« L'apprentissage et le stockage de nouvelles informations se font par des modifications de l'efficacité de la transmission entre neurones. La plasticité synaptique à long terme, qui peut être soit augmentée : potentialisation à long terme (PLT) ; soit diminuée : dépression à long terme (DLT)*, détaille Mickaël Naassila. *On savait déjà que l'alcool perturbe la PLT, nous avons montré que la DLT est beaucoup plus sensible car complètement abolie, ce qui n'était pas connu. »*

Les chercheurs ont, par ailleurs, établi que les effets délétères de l'alcool sur la mémoire passent par le glutamate, un neurotransmetteur, et son récepteur NMDA, ce toxique entraînant une modification d'une sous-unité de ce récepteur. Chez ces animaux de laboratoire, les effets amnésiants de l'alcool ont pu être prévenus par l'administration au préalable de D-sérine, une molécule aux propriétés promnésiantes. Inversement, une injection de kétamine, un anesthésique bloquant le récepteur NMDA, a eu des effets comparables à ceux de l'alcool.

La prochaine fois que l'équipe de Naassila ira faire de la prévention dans les écoles, elle saura quoi répondre aux élèves qui croient encore que les ivresses occasionnelles sont sans conséquences.

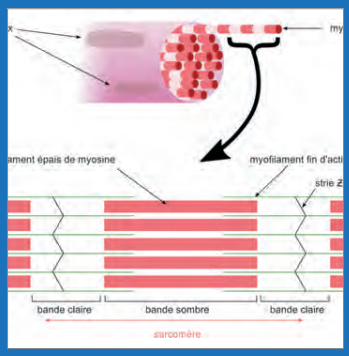
Sandrine Cabut, *Le Monde*
daté du 19.08.2015

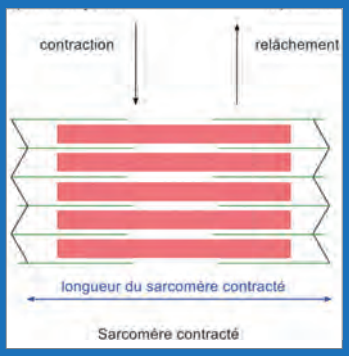
POURQUOI CET ARTICLE ?

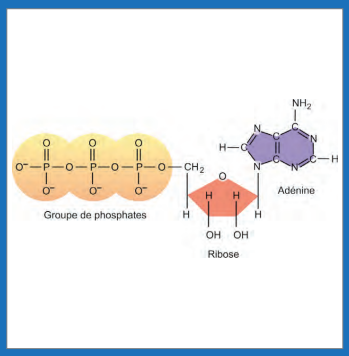
Depuis plusieurs années, le nombre de personnes déclarant au moins un épisode d'ivresse par an est en augmentation, en particulier chez les adolescents dont le cerveau est encore en cours de développement. **Cet article présente le résultat d'une étude menée dans le cadre d'un projet franco-britannique dont l'objectif est d'étudier les conséquences de ces ivresses notamment chez les jeunes.** Une équipe de chercheurs français a étudié chez des rats adolescents les conséquences de deux épisodes d'alcoolisation aiguë, également appelées *bitures express* ou *binge drinking*. Alors qu'après une seule alcoolisation aiguë, la plasticité synaptique à l'origine des phénomènes d'apprentissage est conservée chez les jeunes rats, deux alcoolisations rapprochées perturbent pendant plus d'une semaine ce processus cérébral, dont la mémorisation. Les scientifiques cherchent à détailler les processus affectés et à en décrire les bases moléculaires. Chez les adolescents, les différentes conséquences des alcoolisations aiguës, comme les trous de mémoire, sont largement décrites. Tant chez les rats que dans l'espèce humaine, les alcoolisations aiguës chez les jeunes dont le cerveau est encore en cours de maturation, ont des conséquences dommageables sur la structure et le fonctionnement cérébral.

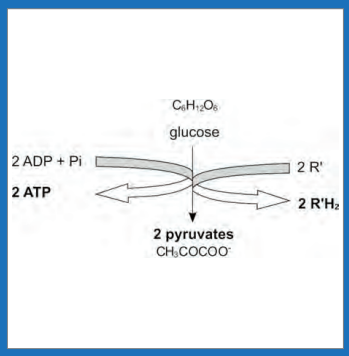
© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

PRODUIRE LE MOUVEMENT : CONTRACTION MUSCULAIRE ET APPORT D'ÉNERGIE









© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

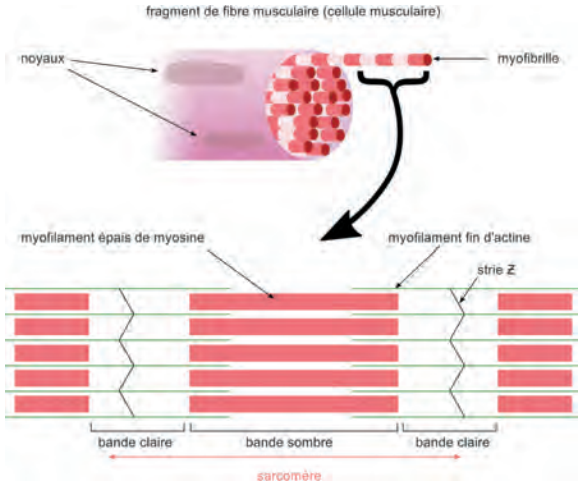
La cellule musculaire : une structure spécialisée dans son propre raccourcissement

La contraction des muscles striés squelettiques, c'est-à-dire attachés au squelette, permet la réalisation du mouvement. Cette contraction nécessite de l'énergie, disponible dans la cellule musculaire sous forme d'ATP (adénosine triphosphate). Quels sont les mécanismes moléculaires qui permettent la contraction musculaire ?

Le muscle strié squelettique : des cellules spécialisées dans la contraction musculaire

Un muscle strié squelettique est constitué de plusieurs centaines à plusieurs milliers de fibres musculaires, groupées en faisceaux musculaires. Chaque fibre musculaire mesure de 10 à 100 mm de diamètre et plusieurs centimètres de long. Elle est constituée de l'union de très nombreuses cellules musculaires qui ont fusionné, d'où la présence de plusieurs noyaux dans une seule fibre. Elle est dite striée car elle présente une striation perpendiculaire à son axe principal. Le raccourcissement et l'épaississement des muscles lors de la contraction musculaire permettent le mouvement relatif des deux os auxquels ces muscles sont attachés par des tendons.

La cellule musculaire, cellule spécialisée, est caractérisée par un cytosquelette particulier, composé principalement de deux protéines : l'actine et la myosine, responsables du raccourcissement de la cellule. Chaque fibre musculaire est constituée de quelques centaines à quelques milliers de myofibrilles, présentes sous forme de cylindres allongés. Chaque myofibrille est composée d'unités répétées, les sarcomères, qui sont les unités de structure et de fonction du muscle.



Organisation d'une fibre musculaire.

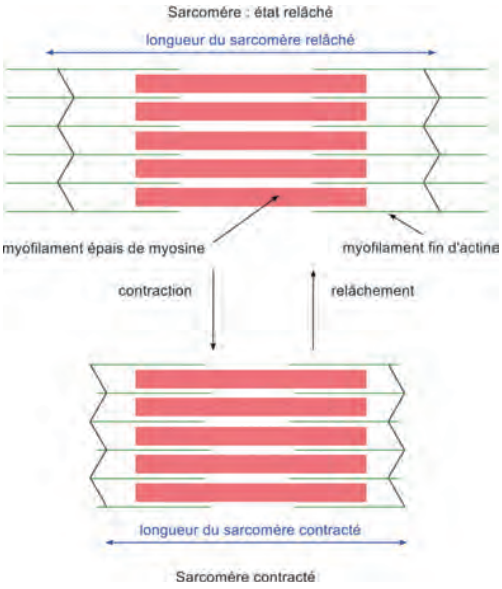
Chaque sarcomère contient différentes parties :

- en son centre, une bande sombre (appelé bande A), un peu plus claire en son milieu (bande H) ;
- deux demi-bandes claires (demi-bandes I), placées de part et d'autre de la bande sombre centrale.

Une strie en forme de zigzag, appelée strie Z, sépare les sarcomères adjacents. Les sarcomères sont constitués de deux types de myofilaments protéiques :

- des myofilaments épais de myosine, localisés au niveau de la bande sombre centrale (bande A). Leur diamètre est de 10 nm et leur longueur est 1,5 µm. Chaque molécule de myosine est constituée d'un bâtonnet portant deux têtes ;
- des myofilaments fins d'actine présents dans tout le sarcomère sauf en son centre, au niveau de la bande H. Leur diamètre est de 5 nm et leur longueur est 1 µm.

Ainsi, les bandes claires latérales (bandes I) ne contiennent que des filaments fins d'actine, superposés les uns aux autres. La bande centrale sombre (bande A) contient des myofilaments d'actine et de myosine, ce qui explique son aspect foncé. Au niveau de la bande claire centrale (bande H), les myofilaments d'actine sont absents : la seule présence des myofilaments de myosine explique la couleur plus claire de cette bande.



Le sarcomère : unité de structure et de fonction du muscle.

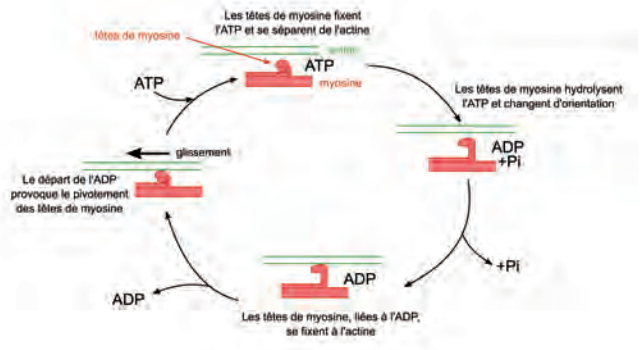
La contraction musculaire

La contraction musculaire consiste en un raccourcissement des différents sarcomères, juxtaposés les uns aux autres le long des fibres musculaires. Ce raccourcissement résulte du glissement des myofilaments d'actine et de myosine les uns sur les autres, qui se répète dans le temps et est coordonné sur l'ensemble du muscle. Le raccourcissement des sarcomères s'effectue de manière cyclique et utilise de l'énergie sous forme d'ATP.

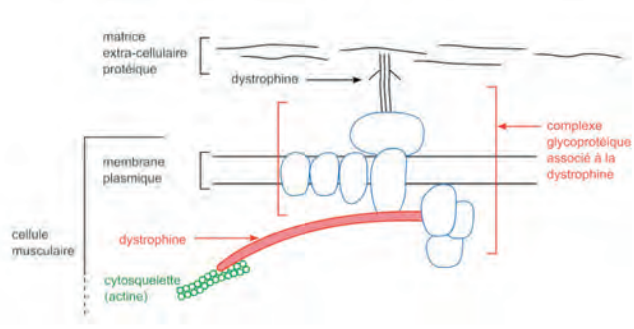
Le cycle du raccourcissement du sarcomère, à l'origine de la contraction musculaire, s'effectue en 4 grandes étapes et nécessite de l'ATP :

- 1re étape : attachement de l'ATP sur la tête de myosine. La fixation d'une molécule ATP sur une tête de myosine est nécessaire à la dissociation du complexe formé par l'actine et la myosine ;
- 2e étape : pivotement de la tête de myosine. L'hydrolyse de l'ATP en ADP (adénosine diphosphate) entraîne le retour de la tête de myosine en position initiale ;
- 3e étape : départ du Pi. La tête de myosine liée à l'ADP et au Pi peut alors se fixer à l'actine ;
- 4e étape : départ de l'ADP et raccourcissement du sarcomère. La libération de l'ADP permet le pivotement de la tête de myosine qui entraîne le glissement relatif de l'actine et de la myosine, ce qui provoque le raccourcissement du sarcomère et donc la contraction musculaire.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.



Le cycle de raccourcissement du sarcomère.



Fonction de la dystrophine dans la cellule musculaire.

Les myopathies : la myopathie de Duchenne

Les myopathies sont les maladies du muscle, caractérisées par une faiblesse musculaire ou une difficulté à pratiquer des exercices musculaires, de manière intermittente ou permanente. Parmi les myopathies, on distingue les dystrophies musculaires, des maladies génétiques caractérisées par une dégénérescence progressive des muscles squelettiques, mais aussi des muscles lisses et cardiaques. Parmi les dystrophies musculaires, la myopathie de Duchenne résulte d'anomalies au niveau de la dystrophine, une protéine présente dans les cellules musculaires. Chez l'individu non malade, celle-ci interagit avec le cytosquelette de la cellule musculaire et la matrice extracellulaire, permettant l'ancrage de la cellule musculaire dans cette matrice.

La dystrophine est liée à des filaments d'actine et à plusieurs autres protéines. En particulier, elle interagit avec un complexe protéique constitué de cinq glycoprotéines transmembranaires. Celui-ci est associé à une protéine extracellulaire, liée à la laminine, une protéine de la matrice extracellulaire. Différentes **mutations** dans le gène codant la dystrophine sont à l'origine de dystrophines non fonctionnelles. La sollicitation des muscles par le malade endommage les cellules musculaires, provoquant leur dégénérescence progressive. Le gène codant la dystrophine est porté par le chromosome X : la maladie est récessive et n'affecte quasiment que les garçons. Il s'agit d'une **maladie rare** (100 à 150 enfants naissent chaque année en France atteints de cette maladie) et grave. Des traitements de thérapie génique sont en cours afin d'essayer de trouver un traitement.

QUATRE ARTICLES DU *MONDE* À CONSULTER

- L'ultra-trail, un sport extrême, mais qui peut être accessible à tous p. 76 (Catherine Pacary, *Le Monde* daté du 31.08.2018)
- Myopathies : la longue marche des essais cliniques p. 77 (Florence Rosier, *Le Monde* daté du 23.03.2016)
- Des souris sédentaires se muent en marathoniennes p. 78 (Marc Gozlan, *Le Monde* daté du 10.05.2017)
- Dopage : les « microdoses » d'EPO de mieux en mieux détectées p. 80 (Clément Guillou, *Le Monde* daté du 14.06.2019)

ZOOM SUR…

LES ACCIDENTS DU SYSTÈME MUSCULO-SQUELETTIQUE

Des accidents peuvent affecter le muscle à la suite d'une forte contraction ou d'un choc violent. On distingue par ordre de gravité croissante :

- l'élongation (rupture de quelques cellules musculaires) ;
- le claquage (rupture musculaire caractérisée par la destruction de nombreuses cellules musculaires, associée à la rupture de vaisseaux sanguins) ;
- la rupture musculaire (présence d'une boule de masse musculaire au niveau de la rupture).

Les tendons, parties terminales du muscle permettant son insertion sur le squelette, sont souvent le lieu de ces ruptures. La tendinite est une inflammation d'un tendon, après une sollicitation excessive, par exemple.

Des accidents peuvent également toucher les ligaments, structures fibreuses résistantes reliant les os des articulations et orientant leur mobilité. Une entorse est un traumatisme des ligaments consécutive à leur trop forte mobilisation.

La luxation est un déplacement relatif des os participant à l'articulation, qui ne sont alors plus emboîtés. Elle s'accompagne souvent d'une déchirure ou d'une rupture des ligaments. Au niveau de l'articulation est sécrété le liquide synovial qui, par son rôle lubrifiant, réduit la friction entre les pièces osseuses. Un traumatisme sur l'articulation peut être à l'origine d'un excès de sécrétion du liquide synovial, appelé épanchement de synovie.

NOTIONS-CLÉS

LES CELLULES MUSCULAIRES DANS L'ORGANISME

Les cellules musculaires sont également appelées fibres musculaires ou myocytes. Elles regroupent 3 types de cellules, spécialisées dans la contraction :

- les cellules musculaires striées squelettiques sont reliées par des tendons au squelette ; leur contraction, sous contrôle nerveux, est responsable des mouvements réflexes et des mouvements volontaires ;
- les cellules musculaires striées cardiaques sont capables de se contracter de manière spontanée et rythmée en l'absence de toute commande : elles sont responsables des battements du cœur ;
- les cellules musculaires lisses ne présentent pas de striations et sont responsables des contractions involontaires des organes des appareils digestif, respiratoire, circulatoire, urinaire et génital. L'activité des muscles lisses, dont la commande est inconsciente et involontaire, est sous le contrôle du système nerveux autonome.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Origine de l'ATP dans la cellule musculaire

La cellule musculaire consomme une quantité importante d'ATP pour réaliser ses cycles de contraction. Quelles sont les voies métaboliques permettant à la cellule musculaire de se fournir en ATP ?

La molécule d'ATP : une forme d'énergie directement utilisable par la cellule

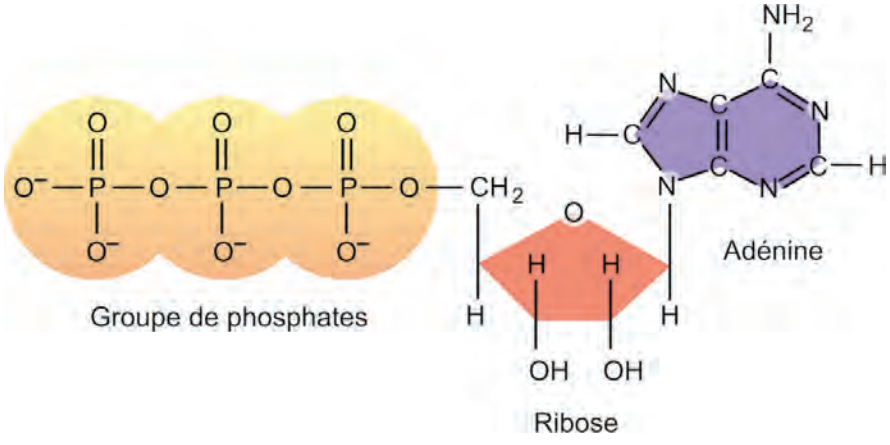
L'ATP (adénosine triphosphate) est la forme d'utilisation de l'énergie par la cellule, qui constitue l'intermédiaire entre les réactions libérant de l'énergie et celles en consommant. **L'hydrolyse** de l'ATP est une réaction de **déphosphorylation**, formant de **l'ADP** (adénosine diphosphate) et un phosphate inorganique, noté Pi. Cette réaction libère de l'énergie et est couplée à des réactions consommant de l'énergie. La réaction d'hydrolyse de l'ATP est :

$$ATP + H_2O \rightarrow ADP + Pi$$

La **synthèse** d'ATP est la **phosphorylation** de l'ADP en présence de phosphate inorganique. Elle consomme de l'énergie, fournie par le métabolisme énergétique de la cellule. La réaction de synthèse de l'ATP est :

$$ADP + Pi$$

L'ATP n'est pas stockée dans la cellule mais est constamment **régénérée** par le métabolisme. Dans la cellule musculaire, il existe deux grandes voies métaboliques d'utilisation du glucose pour produire de l'ATP : la **respiration cellulaire** et la **fermentation lactique.**



La molécule d'ATP.

La respiration cellulaire : une voie métabolique avec un fort rendement en ATP

Dans leur cytoplasme, les cellules musculaires réalisent une **oxydation** partielle du glucose selon un ensemble de réactions appelé **glycolyse**. La glycolyse forme 2 **pyruvates** (CH_3COCOO^-), 2 molécules d'**ATP** et 2 composés réduits **R'H$_2$** (molécules capables de libérer des électrons).

Les réactions de la respiration cellulaire ont lieu dans un organite cellulaire spécialisé : la **mitochondrie**. Celle-ci comporte deux membranes, l'une externe et l'autre interne, délimitant un espace intermembranaire. La membrane interne mitochondriale forme des crêtes saillantes, à l'intérieur de la mitochondrie (appelé matrice). Le pyruvate, issu de la glycolyse, transite jusqu'à la matrice de la mitochondrie, où a lieu le **cycle de Krebs**. Celui-ci consiste en l'oxydation complète du pyruvate **décarboxylé** en **CO$_2$** associée à la formation d'**ATP** et de composés réduits **R'H$_2$**.

La **chaîne respiratoire** est composée de plusieurs molécules et complexes moléculaires situés dans la membrane mitochondriale interne. Au niveau de la chaîne respiratoire, du côté de la matrice, les composés réduits R'H$_2$, provenant de la glycolyse et du cycle de Krebs, cèdent leurs électrons et leurs protons (H^+) aux composants de la chaîne respiratoire, ce qui permet la réoxydation des molécules R'H$_2$ en R'. Les électrons issus des composées R'H$_2$ sont transférés le long de la chaîne respiratoire, puis sont captés par un **accepteur final d'électrons**, l'**O$_2$**, **réduit en H$_2$O**. Lors de ces transferts au sein de la chaîne respiratoire, des protons sont acheminés de la matrice mitochondriale vers l'espace intermembranaire où ils s'accumulent. Ces protons refluent alors spontanément vers

NOTIONS-CLÉS

FIBRE MUSCULAIRE I

Fibre musculaire dite lente, de couleur rouge, fortement vascularisée, caractérisée par une teneur élevée en réserves, en myoglobine (protéine chargée du transport de l'O_2 dans les muscles), et riche en mitochondries. Son métabolisme énergétique est essentiellement aérobie (respiration). Sa vitesse de contraction est faible ; elle peut fonctionner longtemps et participe aux efforts physiques prolongés.

FIBRE MUSCULAIRE II

Fibre musculaire dite rapide, de couleur blanche, faiblement vascularisée, caractérisée par une teneur faible en réserves, en myoglobine, et pauvre en mitochondries. Son métabolisme énergétique est essentiellement anaérobie (fermentation lactique). Elle peut se contracter rapidement mais seulement pendant un temps court ; elle participe aux efforts intenses peu prolongés.

ZOOM SUR…

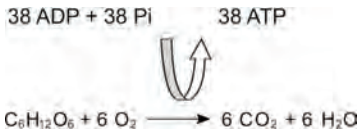
LA RÉCUPÉRATION APRÈS UN EFFORT PHYSIQUE

Il s'agit de la période nécessaire pour assurer le retour, à leurs valeurs de repos, des paramètres physiologiques (cardiorespiratoires, métaboliques, etc.) modifiés par l'exercice. La récupération au niveau cardiorespiratoire est rapide alors que la récupération métabolique est plus longue. Elle dépend de l'intensité et de la durée de l'effort ; elle peut atteindre plusieurs jours pour des efforts prolongés. De bonnes pratiques favorisent cette récupération : réhydratation, étirements adaptés, alimentation aidant à la reconstitution des réserves, massages, sommeil adapté, etc.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

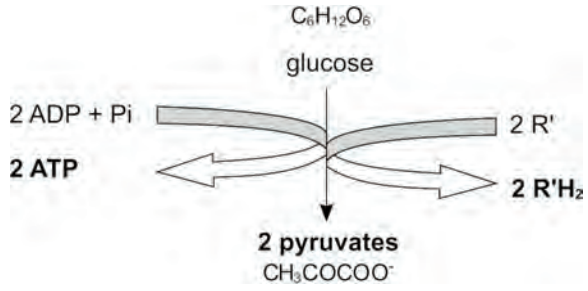
la matrice, uniquement au niveau des **enzymes ATP-synthases**, qui sont responsables de la phosphorylation de l'ADP en ATP dans la matrice mitochondriale.

L'équation-bilan de la glycolyse et de la respiration cellulaire est donc la suivante :

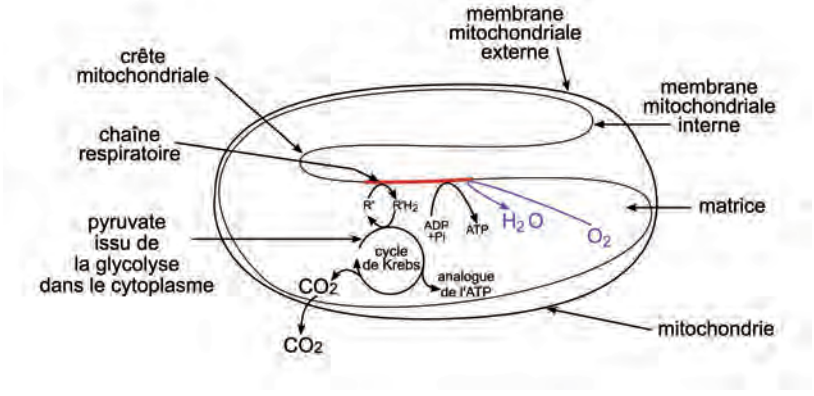


La respiration cellulaire produit au total **38 molécules d'ATP** par molécule de glucose, soit un rendement énergétique très élevé de **40 %.**

Lors d'un effort physique, l'augmentation de l'activité du système cardiovasculaire permet un apport accru de sang bien oxygéné et riche en nutriments aux muscles, ainsi qu'une évacuation efficace du CO_2 produit par les muscles lors de la respiratoire cellulaire. De nombreuses modifications physiologiques contribuent à l'augmentation des activités cardiocirculatoire et respiratoire, déclenchées de manière réflexe. L'individu réalisant un effort physique peut, de manière volontaire, modifier son activité ventilatoire afin de favoriser l'oxygénation de son organisme.



La glycolyse.

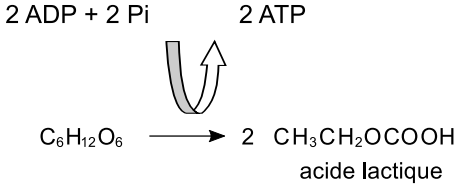


La respiration cellulaire.

La fermentation lactique : une voie métabolique avec un faible rendement en ATP

Les cellules musculaires sont capables de dégrader le glucose sans consommer d'O_2 (en anaérobiose) par **fermentation lactique**. Celle-ci fait suite à la glycolyse et consiste en la dégradation incomplète du pyruvate, qui est réduit en **lactate** dans le cytoplasme. Cette réaction est couplée à la réoxydation des composés $R'H_2$, formés lors de la glycolyse, en composés R'. La fermentation lactique produit **2 molécules d'ATP** par molécule de glucose, soit un rendement énergétique de **2 %,** bien inférieur à celui de la respiration cellulaire.

L'équation-bilan de la glycolyse et de la fermentation lactique est la suivante :



La génération de l'ATP dans les muscles dépend de la **nature**, de la **durée** de l'**effort**, ainsi que du type des **fibres musculaires** sollicitées. De manière générale, en tout début d'effort, la cellule musculaire utilise sa faible réserve d'ATP pendant quelques secondes. Puis ont lieu des réactions de transfert de groupements phosphates de la **phosphocréatine**, molécule présente dans la cellule musculaire, à l'ADP, formant ainsi de l'ATP et de la créatine. Un peu plus tard, la **fermentation lactique** anaérobie permet la production d'ATP. Si l'effort se poursuit, la **respiration cellulaire** permet la synthèse d'ATP.

ZOOM SUR…

UNE PRATIQUE DANGEREUSE POUR LA SANTÉ : LE DOPAGE

Le dopage sportif est la consommation de produits ou la réalisation de pratiques ayant pour but d'augmenter les capacités physiques pour obtenir une performance supérieure, notamment en compétition. Les produits utilisés ont des effets et des modes d'action variés. Les stéroïdes anabolisants sont des produits dopants agissant sur le muscle. Ils font partie de la famille des hormones stéroïdiennes, à laquelle appartient l'hormone sexuelle masculine, la testostérone. Les stéroïdes anabolisants stimulent la synthèse des protéines dans les cellules, augmentant la masse des tissus musculaires. Leur consommation à long terme est dangereuse pour la santé, car ils perturbent le métabolisme des lipides, en particulier celui du cholestérol, et peuvent entraîner une hypertension artérielle et des lésions dans certains organes comme le foie et le cœur. D'autres pratiques visent à accroître l'efficacité de l'apport d'O_2 aux muscles, comme l'EPO (érythropoïétine), hormone stimulant la production des globules rouges et qui est produite naturellement par la moelle osseuse. L'augmentation du nombre d'hématies accroît l'hématocrite, c'est-à-dire le volume occupé par les globules rouges dans le sang. Cette augmentation peut provoquer des complications cardiovasculaires importantes. Il existe également des produits qui luttent contre la fatigue, comme les amphétamines, ou des produits masquants dont l'objectif est de cacher la présence de produits dopants interdits par les réglementations en vigueur.

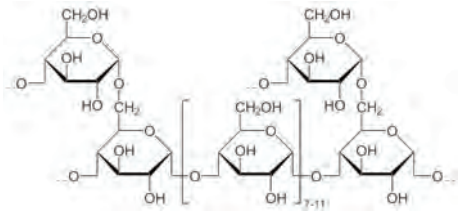
© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Le contrôle des flux de glucose dans l'organisme

Les cellules musculaires ont besoin de nutriments, principalement de glucose, et de dioxygène, véhiculés par le sang. Le dioxygène, fourni par la respiration pulmonaire, et le glucose, issu de l'hydrolyse des glucides alimentaires dans le tube digestif, sont apportés aux muscles par la circulation sanguine. Comment s'effectuent les flux de glucose dans l'organisme ? Comment ces flux de glucose sont-ils contrôlés au sein de l'organisme pour permettre un apport énergétique adapté aux cellules musculaires lors d'un effort physique ?

La consommation de glucose par les cellules musculaires à l'effort

Alors que les apports alimentaires sont discontinus, la consommation continue de glucose par les cellules de l'organisme est essentielle pour leur fonctionnement, mais elle varie en fonction de l'activité de ces cellules. Lors de l'effort physique, l'activité accrue des cellules musculaires provoque une augmentation de leur consommation de glucose. Une partie de celui qui est alors utilisé provient de l'hydrolyse des réserves de **glycogène musculaire**, un polymère ramifié de glucose. Au début de l'effort physique, le glucose consommé provient majoritairement de cette **hydrolyse** (seule une faible part du glucose consommé est apportée par le sang). Lorsque l'effort se prolonge, l'épuisement du glycogène musculaire entraîne la diminution progressive de la part du glucose qui en est issu, et l'augmentation de la part de **glucose apporté par le sang**. Ainsi, lors de l'effort, la forte consommation en glucose des cellules musculaires nécessite l'utilisation du glucose sanguin. L'organisme doit cependant maintenir constante la concentration sanguine en glucose, ou **glycémie**, autour d'une valeur de **1 g·L⁻¹**.



Le glycogène, polymère de glucose.

Durant l'effort physique, le glucose sanguin utilisé par les cellules musculaires provient principalement de la mobilisation du glycogène du foie. Après un repas, le foie, irrigué par la veine porte hépatique qui contient du sang en provenance de l'intestin, peut y prélever du glucose issu de l'absorption intestinale, et le stocker sous forme de glycogène. Selon les besoins, le **glycogène hépatique** est hydrolysé en glucose et libéré dans la circulation sanguine au niveau de la veine sus-hépatique. Le foie est le seul organe capable de libérer dans le sang le glucose provenant de son glycogène pour le mettre à la disposition du reste de l'organisme. Le **foie** et **l'intestin** sont donc les **organes sources de glucose** dans l'organisme.

La régulation de la glycémie

Le pancréas contient une partie endocrine, formée d'amas cellulaires appelés **îlots de Langerhans**, qui secrètent dans le sang des hormones responsables de la régulation de la glycémie : **l'insuline** et le **glucagon**. Les cellules des îlots de Langerhans détectent les variations de la glycémie et la comparent à la valeur de référence (1 g·L⁻¹). Lorsque la glycémie est trop élevée, comme après un repas, les cellules des îlots de Langerhans sécrètent dans le sang **l'insuline**, une hormone **hypoglycémiante**. Celle-ci active le prélèvement du glucose sanguin par ses cellules cibles et son stockage intracellulaire, notamment sous forme de glycogène. En particulier, l'insuline est responsable de l'augmentation de la quantité de transporteurs membranaires

DATES-CLÉS

LES GRANDES ÉTAPES DE LA COMPRÉHENSION DE LA RÉGULATION DE LA GLYCÉMIE

1855 : expérience du foie lavé par Claude Bernard, mettant en évidence la capacité du foie à restituer du glucose à partir du glycogène.

1857 : isolement du glycogène par Claude Bernard.

1889 : mise en évidence du rôle du pancréas dans la régulation de la glycémie par Oskar Minkowski et Josef von Mering.

1921 : isolement de l'hormone hypoglycémiante, l'insuline, par Frederick Banting (Prix Nobel 1923) et Charles Best.

1923 : description d'un principe actif hyperglycémiant extrait du pancréas, baptisé glucagon, par Charles Kimball et John Murlin.

1953 : isolement de l'hormone hyperglycémiante, le glucagon, par Alfred Staub et Otto K. Béhrens.

CHIFFRES-CLÉS

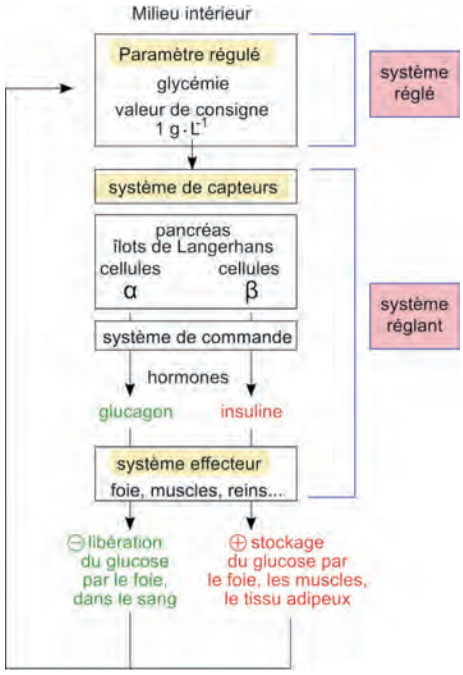
LE DIABÈTE DANS LE MONDE (2014)

La prévalence (nombre de cas rapporté à l'effectif de la population) mondiale du diabète est estimée à 8,5 %, soit 422 millions d'individus diabétiques, ce qui représente 1 personne sur 11 atteinte par un diabète, majoritairement de type 2. En 2015, le diabète a été directement responsable de 1,6 million de décès.

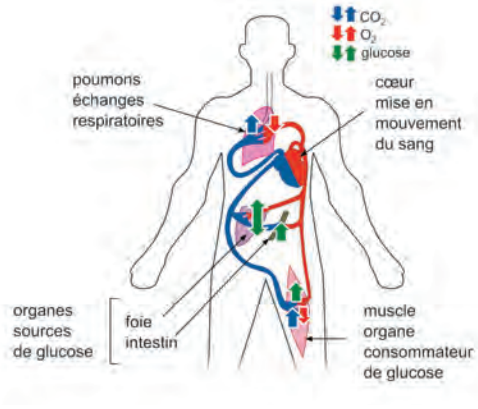
LES CHIFFRES DU DIABÈTE EN FRANCE (2016)

La prévalence du diabète qui est traité de façon pharmacologique en France est de 5 %, soit 3 321 000 diabétiques. On estime que 11 960 décès peuvent être attribués directement au diabète en 2016. Ce chiffre sous-estime le nombre réel de personnes diabétiques, car il ne tient pas compte des personnes diabétiques non traitées.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.



La régulation de la glycémie.



Le métabolisme énergétique à l'effort.

faisant entrer le glucose dans les cellules hépatiques et musculaires.

Ainsi, un apport accru de glucose dans l'organisme conduit à son stockage sous forme de **glycogène**, notamment dans les cellules **hépatiques** et **musculaires**. À l'inverse, en cas de baisse de la glycémie, comme lors d'un effort physique prolongé, les **cellules** des îlots de Langerhans secrètent du **glucagon**, une hormone **hyperglycémiante**. Le glucagon agit principalement sur le foie en stimulant l'hydrolyse du glycogène en glucose libéré dans le sang. Ainsi, lors d'un effort physique, le **contrôle hormonal** de la glycémie permet la mobilisation des réserves de l'organisme en libérant du glucose, et rend possible la consommation accrue de glucose par les muscles. Les conséquences des perturbations de ce système de régulation, notamment lors du diabète, montrent le rôle essentiel de cette **homéostasie** dans l'organisme.

Le diabète : une hyperglycémie chronique

Un patient est dit diabétique si sa glycémie mesurée à jeun est supérieure à 1, 26 $g.L^{-1}$ à deux reprises. Le diabète se caractérise par une **hyperglycémie chronique** : la concentration en glucose dans le sang est trop élevée et le glucose s'accumule dans les vaisseaux sanguins des différents tissus, entraînant de graves conséquences à long terme (maladies cardiovasculaires, cécité, insuffisance rénale, etc.). Différents types de diabète existent dont le diabète de type 1 et le diabète de type 2, forme la plus fréquente.

Le **diabète de type 1** (5 % des cas de diabète), aussi appelé diabète insulinodépendant ou diabète juvénile, touche des personnes jeunes, et son apparition est brutale. Il s'agit d'une **maladie auto-immune** : le système immunitaire sécrète des anticorps dirigés contre les cellules β des îlots de Langerhans du pancréas, entraînant une disparition de ces cellules sécrétrices d'insuline. La **diminution de la sécrétion d'insuline** provoque alors une augmentation de la glycémie. Le traitement consiste en un suivi régulier de la glycémie par le patient et en l'injection appropriée d'insuline pour faire baisser la glycémie.

Le **diabète de type 2** ou diabète non insulinodépendant est la forme de diabète la plus répandue (92 % des cas de diabète) ; il affecte les adultes à partir de 40-50 ans. Son apparition est progressive : le patient est souvent en surpoids ou présente une obésité. L'origine du diabète de type 2 est **l'insulinorésistance** : la sensibilité des cellules cibles de l'insuline, dont celle des cellules hépatiques, diminue. Cette baisse de sensibilité est d'abord compensée par une augmentation de la sécrétion d'insuline, d'où une glycémie normale : on parle d'**intolérance au glucose**. En absence de prise en charge thérapeutique, cette intolérance évolue en diabète, car la sécrétion de l'insuline par les cellules β diminue, entraînant une hyperglycémie chronique. Le traitement du diabète de type 2 consiste en la prise de médicaments hypoglycémiants, associée à une alimentation adaptée et à la pratique régulière d'activité physique, et si besoin, à des injections d'insuline.

DEUX ARTICLES DU *MONDE* À CONSULTER

- Bouger pour contrer le diabète p. 81 (Pascale Santi, *Le Monde* daté du 22.11.2017)
- Le diabète bientôt à l'heure du pancréas artificiel p. 82 (Sandrine Cabut, *Le Monde* daté du 16.03.2016)

ZOOM SUR…

DIABÈTE GESTATIONNEL OU DIABÈTE DE GROSSESSE

Le diabète gestationnel est un trouble de la tolérance glucidique, lié aux modifications hormonales lors de la grossesse, qui conduit à une glycémie trop élevée. La prévalence actuelle en France est de 8 %. Dans certains cas, les femmes ont déjà un diabète non diagnostiqué qui sera alors mis en évidence par la grossesse. Dans d'autres cas, elles développent un diabète uniquement lors de la grossesse, et qui disparaît par la suite. Cependant, le risque de développer un diabète de type 2 augmente dans les années qui suivent le diabète gestationnel. Certains facteurs augmentent le risque de développement du diabète gestationnel (grossesse tardive, antécédents de diabète gestationnel, IMC élevé, etc.). Le diabète gestationnel, repéré précocement et bien pris en charge notamment par une alimentation équilibrée, n'entraîne de risques ni pour l'enfant à naître ni pour la mère.

LE DIABÈTE MODY

Le diabète de type MODY (*Maturity-Onset Diabetes of the Young*, ou diabète de type adulte chez le jeune) est une forme spécifique de diabète, différent des diabètes de type 1 et de type 2. Il a pour origine une anomalie de la régulation de la sécrétion d'insuline par le pancréas. Il s'agit d'une forme rare de diabète, dont la prévalence en France est de 1 à 5 cas pour 10000 habitants. Ce diabète apparaît dès l'enfance ou l'adolescence. Le diabète MODY est une maladie génétique à transmission autosomale dominante.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion & communication strictement interdites.

Le rôle du foie dans le contrôle des flux de glucose de l'organisme, exercice 1

Le sujet

Vers 1860, le médecin et physiologiste français, Claude Bernard, s'intéresse au rôle du foie dans l'approvisionnement de l'organisme en glucose. Dans son ouvrage *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*, il relate l'expérience appelée expérience du foie lavé :

« J'ai choisi un chien adulte, vigoureux et bien portant […]. Je le sacrifiai 7 heures après un copieux repas de tripes. Aussitôt, le foie fut enlevé, et cet organe fut soumis à un lavage continu par la veine porte […] pendant 40 minutes. J'avais constaté au début de l'expérience que l'eau colorée en rouge qui jaillissait par les veines hépatiques était sucrée ; je constatai, en fin d'expérience, que l'eau parfaitement incolore qui sortait ne renfermait plus aucune trace de sucre […]. J'abandonnai dans un vase ce foie à température ambiante et, revenu 24 heures après, je constatai que cet organe que j'avais laissé la veille complètement vide de sucre s'en trouvait pourvu très abondamment. »

Introduction à l'étude de la médecine expérimentale, Claude Bernard, 1865.

À l'aide de vos connaissances, vous proposerez une analyse du protocole et des résultats de l'expérience du foie lavé de Claude Bernard, puis vous expliquerez comment le foie participe à l'approvisionnement des cellules musculaires lors de l'effort physique.

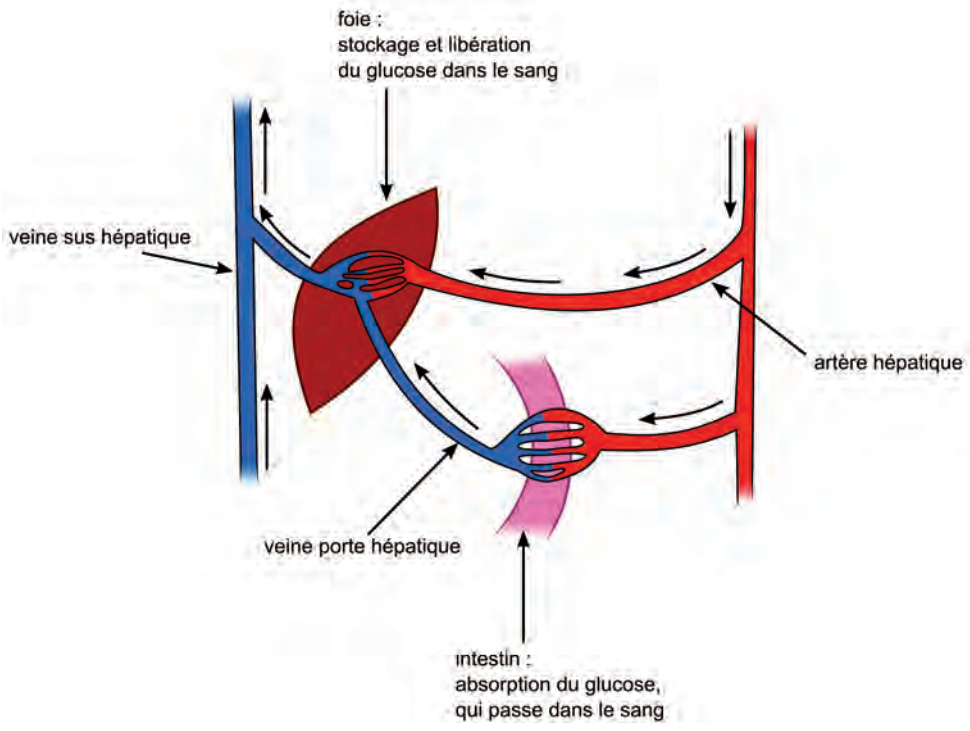
Le système de régulation de la glycémie n'a pas à être présenté dans son intégralité.

Le corrigé

L'organisme utilise majoritairement le glucose comme molécule énergétique. Ce glucose provient de la digestion des glucides alimentaires et, une fois dans le sang après avoir été absorbé au niveau de l'intestin, il est prélevé par les cellules de l'organisme pour assurer leur apport énergétique. La consommation de l'organisme en glucose est continue, alors que les apports alimentaires, qui ont lieu lors des repas, sont discontinus. Les flux de glucose de l'organisme doivent donc être l'objet d'une régulation. De plus, l'effort physique entraîne une consommation accrue de glucose par les cellules musculaires pour permettre leur contraction. Au milieu du XIXe siècle, le médecin et physiologiste Claude Bernard a posé les bases de la compréhension du système de régulation du taux de glucose dans le sang en déterminant le rôle du foie. En 1865, il réalise l'expérience du foie lavé chez un chien. Quelle analyse peut-on faire du protocole et des résultats de cette expérience ? Quel est le rôle précis du foie dans l'approvisionnement en glucose des cellules musculaires lors de l'effort physique ? Dans un premier temps, nous analyserons l'expérience du foie lavé de Claude Bernard, ainsi que ses résultats, puis nous préciserons, en complétant avec des connaissances plus actuelles, le rôle du foie dans l'apport en glucose aux cellules musculaires en activité.

I. Analyse du protocole et des résultats de l'expérience du foie lavée de Claude Bernard

Dans l'expérience dite du foie lavé, un chien est nourri avec un repas de viande puis sacrifié 7 heures après, soit une fois la digestion terminée. L'expérimentateur effectue un lavage du foie en faisant passer de l'eau dans la veine porte qui conduit à cet organe, afin d'éliminer tout le sang contenu dans ses vaisseaux sanguins. Il vérifie que l'eau de lavage passée par le foie est incolore et ne contient plus de sucre. Le foie est alors laissé 24 heures à température ambiante, et l'expérimentateur observe alors la forte présence de sucre libéré par le foie. Cette expérience montre que le foie frais, avant lavage, contient du sucre. Ce sucre, le glucose, est soluble dans l'eau et est éliminé par lavage. Puis après un repos de 24 heures, le foie libère de nouveau du glucose dans l'eau dans lequel il est placé. Ainsi, on peut conclure, comme l'a fait Claude Bernard, que le foie est capable, après un certain temps, de libérer du glucose absent auparavant. Le foie contient donc une autre



La position particulière du foie dans la circulation générale.

CE QU'IL NE FAUT PAS FAIRE

Décrire tout le système de régulation de la glycémie et ne pas analyser l'expérience du foie lavé.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

substance, peu ou pas éliminée par lavage et qui fournit du glucose au bout de quelques heures. Claude Bernard a isolé par la suite cette substance contenue dans le foie et l'a baptisée « glycogène ». Le glycogène est un polymère de glucose et constitue sa principale forme de stockage chez les animaux. Après avoir analysé l'expérience et montré que le foie est capable de libérer dans le sang du glucose à partir du glycogène, nous allons préciser le rôle de cet organe dans l'approvisionnement des cellules musculaires lors de l'effort physique.

II. Le foie : un organe source de glucose

Lors de l'effort physique, les cellules musculaires ont un besoin accru en énergie pour permettre la contraction musculaire. Ces cellules peuvent utiliser différents métabolismes pour produire l'ATP (adénosine triphosphate), qui est la molécule énergétique utilisée pour le travail cellulaire. Les cellules musculaires disposent d'une faible réserve d'ATP, ce qui les oblige à en produire constamment. Une part importante de l'ATP des cellules musculaires provient de l'utilisation du glucose. Cette utilisation peut s'effectuer soit par respiration cellulaire en présence d'O_2, soit par fermentation lactique, qui ne nécessite pas d'O_2. L'approvisionnement en glucose des cellules musculaires est donc indispensable au fonctionnement de ces cellules lors de l'effort physique. Au début de l'effort, les cellules musculaires utilisent leur propre glucose, puis le glucose issu de l'hydrolyse du glycogène qu'elles ont en réserve. En même temps, les cellules musculaires commencent à prélever du glucose dans la circulation sanguine. Comment est maintenue constante la concentration en glucose du sang, alors que les cellules musculaires en prélèvent de manière importante lors de l'effort physique ?

Le foie présente une position particulière dans la circulation sanguine générale : il est irrigué par une artère hépatique lui apportant du sang riche en O_2, mais il est également irrigué par une veine porte, vaisseau contenant du sang pauvre en O_2 issu de l'intestin. La veine hépatique permet l'apport au foie de sang contenant des molécules absorbées au niveau de l'intestin, dont le glucose d'origine alimentaire. Une veine hépatique, contenant du sang pauvre en O_2 mais potentiellement enrichi en molécules issues du foie, part du foie et rejoint la circulation générale.

Après un repas, les glucides alimentaires sont digérés et les molécules glucidiques, principalement le glucose en résultant, sont absorbées au niveau l'intestin. La veine porte apporte du sang enrichi en glucose provenant de l'intestin au foie. Le foie prélève le glucose sanguin et le stocke sous forme de glycogène. Puis, lors d'un effort physique par exemple, le foie est capable d'hydrolyser son glycogène et de libérer le glucose dans la veine hépatique. Le glucose qui arrive ainsi dans la circulation générale peut alors être prélevé par les cellules de l'organisme, dont les cellules musculaires. Le foie constitue, avec l'intestin responsable de l'absorption du glucose, un organe source permettant l'approvisionnement en glucose des cellules musculaires lors de l'effort physique. Le foie est le seul organe de l'organisme capable de restituer dans le sang le glucose qu'il a stocké au préalable sous forme de glycogène : les réserves glucidiques du foie sont dites publiques, car elles peuvent être utilisées par tout le reste de l'organisme. Les réserves glucidiques des autres organes, dont celles des muscles, sont qualifiées de privées, car elles ne peuvent être utilisées que par les organes qui les contiennent. Les cellules musculaires utilisent aussi pour leur approvisionnement en énergie des lipides stockés principalement dans les adipocytes ou cellules du tissu adipeux.

Ainsi, l'expérience du foie lavé de Claude Bernard a permis de montrer le rôle essentiel du foie dans la régulation des flux de glucose dans l'organisme. Le foie est capable de stocker du glucose sous forme de glycogène et de l'hydrolyser pour restituer du glucose à l'organisme en cas de besoin. Lors de l'effort physique, les cellules musculaires utilisent d'abord leur ATP, du glucose musculaire et du glucose provenant du glycogène musculaire. Rapidement, elles utilisent du glucose sanguin, issu de l'alimentation ou de l'hydrolyse du glycogène hépatique. Ainsi le foie est un organe à l'origine de l'approvisionnement des cellules musculaires lors de l'effort physique. Le fonctionnement du foie (du stockage du glucose sous forme de glycogène à la libération de ce glucose) nécessite un système de contrôle de la glycémie, qui est le taux de glucose dans le sang. Comment s'effectue alors la régulation de la glycémie au niveau de l'organisme ?

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Le métabolisme des cellules cardiaques, exercice 2

Le sujet (d'après bac S, 2016, Polynésie)

Le muscle cardiaque doit se contracter régulièrement. Il a un besoin constant d'énergie et ne dispose que d'un stock réduit d'ATP ne permettant que quelques contractions.

À partir de l'étude des documents et de l'utilisation des connaissances, déterminez quel est le principal type de métabolisme utilisé par les cellules cardiaques pour produire de l'énergie en grande quantité. Précisez l'origine et la nature des molécules énergétiques dégradées.

Document 1 — Des réserves énergétiques dans les cellules.

Document 1.a — Les réserves de glycogène.

Le glucose alimentaire est rapidement stocké sous forme de glycogène essentiellement dans les cellules hépatiques mais également dans les cellules musculaires.

	Muscle squelettique	Muscle cardiaque
Glycogène (polymère glucidique)	150 mol/g	30 mol/g
ATP	5 mol/g	5 mol/g

D'après Stanley et coll., Physiol. Rev. 2005, vo/85.

Document 1.b — Les réserves de lipides.

Les lipides sont stockés dans le cytoplasme des cellules du tissu adipeux sous forme de triglycérides.

Les triglycérides sont constitués d'acides gras qui peuvent être libérés dans la circulation sanguine et utilisés par les autres cellules de l'organisme, dont les cellules musculaires. Dans les cellules musculaires, cardiaques et squelettiques, les réserves lipidiques sont généralement peu importantes.

Document 3 — Production d'énergie et molécules.

Document 3.a — Des rendements différents suivant la molécule utilisée.

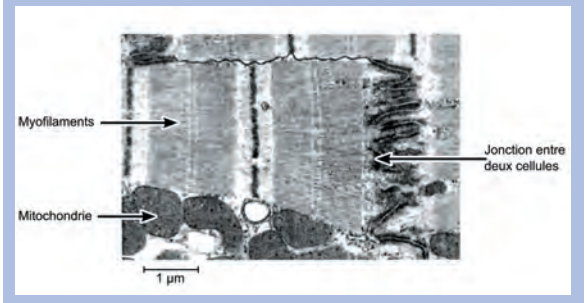
Les cellules peuvent utiliser différents nutriments pour produire l'énergie dont elles ont besoin. Les principaux nutriments utilisés sont le glucose et les acides gras. Dans le cytoplasme, le glucose subit la glycolyse pour former du pyruvate dont la dégradation totale au niveau des mitochondries permet la synthèse d'ATP. Les acides gras subissent eux, une β-oxydation pour former de l'acétyl-CoA, molécule qui, comme le pyruvate, est dégradée dans les mitochondries pour former de l'ATP.

On compare le rendement énergétique de ces deux types de substrat, les résultats sont présentés ci-dessous.

Nature du substrat	Molécules d'ATP formées par molécule de substrat dégradée	Molécules d'O_2 consommées par molécule de substrat dégradée
Glucose $C_6H_{12}O_6$	36 molécules	12
Acide palmitique* $C_{16}H_{32}O_2$	129 molécules	50

* L'acide palmitique est un acide gras qui intervient dans la constitution des triglycérides.

Document 2 — Les caractéristiques des cellules musculaires cardiaques ou cardiomyocytes.



Les cellules musculaires cardiaques sont de forme cylindrique et plus courtes que les cellules des muscles squelettiques. Dans leur cytoplasme, on observe les myofilaments d'actine et de myosine ainsi que de très nombreuses mitochondries qui peuvent représenter jusqu'à 30 % du volume cellulaire.

Document 3.b — Molécules énergétiques utilisées par les cellules musculaires du cœur.

Les cellules musculaires du cœur peuvent utiliser une grande variété de nutriments. Le tableau ci-dessous indique dans quelles proportions sont utilisées les différentes molécules énergétiques.

	Molécules énergétiques dégradées par les cardiomyocytes (en pourcentage)
Acides gras	60
Glucose	30

CE QU'IL NE FAUT PAS FAIRE

Oublier de citer des grandeurs chiffrées pour appuyer votre raisonnement.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Le corrigé

Divers types muscles sont présents dans l'organisme : les muscles lisses, les muscles striés squelettiques et les muscles striés cardiaques. Or, la contraction régulière du muscle cardiaque permet la circulation du sang, indispensable à l'organisme. L'approvisionnement en énergie de ce muscle cardiaque est donc essentiel. Quel est le principal métabolisme utilisé par les cellules cardiaques pour se fournir en l'énergie ? Quelles sont l'origine et la nature des molécules énergétiques dégradées ? Nous étudierons d'abord les réserves du muscle cardiaque et les molécules énergétiques disponibles, puis nous caractériserons le métabolisme principal utilisé par les cellules cardiaques.

Les cellules musculaires cardiaques (ou cardiomyocytes) ont besoin d'énergie pour se contracter. La forme d'énergie qu'elles utilisent est l'ATP. En effet, l'hydrolyse de l'ATP en ADP libère de l'énergie, tandis que la synthèse d'ATP à partir d'ADP consomme de l'énergie. Or, la cellule musculaire contient peu d'ATP (5 mol/g) et doit donc en produire constamment (document 1.a). Comment le cardiomyocyte produit-il l'ATP qu'il utilise ?

Le muscle cardiaque contient un glucide, le glycogène, issu du glucose sanguin provenant de l'alimentation (document 1.a). La concentration du glycogène est plus faible dans le muscle cardiaque (30 mol/g) que dans le muscle squelettique (150 mol/g). Le muscle cardiaque contient d'autres réserves, dont des lipides en faible quantité (document 1.b). L'organisme possède des réserves énergétiques qu'il peut libérer dans le sang pour fournir de l'énergie aux muscles. Le foie contient du glycogène qu'il peut hydrolyser en glucose avant de le libérer dans le sang et que ce dernier soit prélevé par les muscles. Les adipocytes stockent des triglycérides, constitués d'acides gras, qui peuvent être libérés dans le sang et prélevés par les cardiomyocytes.

Les cardiomyocytes utilisent majoritairement les acides gras (60 %) et le glucose (30 %) (document 3.b). La dégradation d'une molécule de glucose par la glycolyse puis par la respiration cellulaire mitochondriale consomme 12 molécules d'O_2 et produit 36 molécules d'ATP (document 3.a). La dégradation des acides gras s'effectue dans le cytoplasme par β-oxydation et produit des molécules d'acétyl-CoA. L'acétyl-CoA est alors dégradée lors de la respiration cellulaire en présence d'O_2 dans les mitochondries, formant de l'ATP. La dégradation d'un acide gras, l'acide palmitique ($C_{16}H_{32}O_2$), consomme 50 molécules d'O_2 et produit 129 molécules d'ATP, constituant un rendement énergétique assez élevé.

D'après le document 2, les cardiomyocytes possèdent de nombreuses mitochondries, organites spécialisés dans la respiration cellulaire. Cette forte quantité de mitochondries indique que les cardiomyocytes réalisent de manière importante la respiration cellulaire, majoritairement pour dégrader les molécules d'acétyl-CoA, issues de la β-oxydation des acides gras provenant des triglycérides prélevés dans le sang.

Ainsi les cardiomyocytes, dont la contraction régulière est indispensable à la survie de l'individu, utilisent comme principal métabolisme énergétique la β-oxydation des acides gras apportés par le sang plutôt que l'oxydation du glucose. L'apport indispensable de nutriments et d'O_2 par le sang aux cardiomyocytes est assuré par la circulation coronaire. Toute difficulté ou tout arrêt de l'approvisionnement peuvent entraîner des problèmes cardiaques, voire un arrêt du cœur. La réduction des facteurs de risques (alimentation déséquilibrée, tabac, faible activité physique) permet de limiter ces accidents cardiaques.

LA BONNE MÉTHODE

Utiliser les connecteurs logiques

Dans les réponses aux exercices 1 et 2, une argumentation ou un raisonnement structuré sont attendus. Pour cela, il est indispensable d'utiliser les connecteurs logiques. Les connecteurs logiques sont des mots ou des expressions qui assurent une relation permettant d'établir un lien logique ou chronologique entre deux propositions ou deux phrases. Ces connecteurs logiques sont nécessaires pour structurer votre texte et mettre en évidence les différentes étapes de votre démarche scientifique. Il s'agit alors d'employer les connecteurs logiques de manière appropriée en fonction de la relation à indiquer. Ainsi sont utilisés les connecteurs logiques exprimant la conséquence (donc, en conséquence, par conséquent, ainsi, etc.), la cause (en effet, car, étant donné, parce que, comme, etc.), ou encore l'explication (c'est-à-dire, ainsi, etc.). D'autres connecteurs logiques indiquent un enchaînement (d'une part, d'autre part, tout d'abord, dans un premier temps, enfin, puis, ensuite, etc.). Enfin, certains connecteurs logiques permettent d'exprimer l'analogie (comme, comme si, de même que, etc.), l'addition (et, aussi, de même que, de plus, mais encore, etc.) ou l'opposition (mais, or, cependant, au contraire, à la différence de, par opposition à, néanmoins, etc.). À vous de choisir le bon connecteur logique en fonction de la relation que vous souhaitez indiquer.

Construire et rédiger une conclusion

Les réponses aux exercices 1 et 2 doivent généralement contenir une conclusion. La conclusion se structure en deux parties. La première partie est la résolution du problème posé en introduction. Le développement a permis de présenter votre démarche par la rédaction d'une réponse détaillée. La première partie de la conclusion présente donc un bilan précis et complet, c'est-à-dire une synthèse de votre réponse, en faisant ressortir les grandes idées. La seconde partie de la conclusion est l'ouverture : il s'agit de proposer un nouvel élément de questionnement, en relation avec le sujet traité, mais qui n'a pas été abordé précédemment. Cette ouverture peut être formulée sous forme d'une phrase affirmative ou interrogative. L'essentiel est que le passage entre le bilan et l'ouverture se fasse de manière intéressante et justifiée d'un point de vue scientifique. Au moment de rédiger la conclusion, il est parfois difficile d'avoir des idées d'ouverture : vous pouvez en trouver dans les chapitres suivants de la partie du programme à laquelle appartient le sujet traité, ou faire appel à un élément de l'actualité scientifique ou un fait de société, abordés par exemple dans les articles du *Monde* sélectionné dans cet ouvrage. Enfin, certains évaluateurs ont l'habitude de lire l'introduction puis la conclusion, avant de prendre connaissance du développement. Vérifiez bien que l'introduction et la conclusion sont cohérentes et s'inscrivent dans une même démarche progressive.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

L'ultra-trail, un sport extrême, mais qui peut être accessible à tous

Le 16e Ultra-Trail du mont Blanc se court ce week-end. Théoriquement, tout un chacun est capable de courir ainsi 100 km ou plus.

En quinze ans, l'Ultra-Trail du mont Blanc (UTMB), qui se court du 27 août au 2 septembre, s'est imposé comme l'épreuve emblématique de la discipline. Et en a suivi l'évolution : confidentiel à sa création, en 2003, alors que la « course sur sentier » débarquait de ce côté de l'Atlantique, il connaît un succès exponentiel depuis, avec dix mille participants pour huit cent mille pratiquants estimés en France, séduits par la liberté, le rapport à la nature et la convivialité qu'il induit.

Cet engouement populaire peut surprendre lorsque l'on découvre les caractéristiques techniques de la course : 171,6 km courus en trois jours, 10 340 m de dénivelé positif… Des chiffres qui ont de quoi effrayer le sportif du dimanche.

A tort. Le trail et sa version ultra séduisent justement par leur côté « l'exploit humain à portée de tous et de toutes ». A condition de savoir exploiter au mieux ses ressources physiologiques, comme l'explique au *Monde* le docteur Jean-Charles Vauthier, traileur et médecin sur L'Infernale des Vosges, autre grand rendez-vous des amateurs, dont la 10e édition se tiendra du 7 au 9 septembre.

Un effort pas si intense, mais très long

L'ultra-trail ne demande pas forcément de puiser profondément dans ses réserves. Contrairement à des épreuves comme le sprint, ou comme les épreuves de demi-fond et de fond, voire les marathons.

« Notre corps utilise plusieurs carburants différents, en fonction de la nature de l'effort », détaille Jean-Charles Vauthier. Ils sont au nombre de trois, pour faire simple.

Lors d'un effort très bref et très intense, comme un 100-mètres, *« l'athlète est en anaérobie* [il court sans respirer]. *C'est épuisant mais efficace, sur un temps maximal de trente secondes, pour les meilleurs. »*

Ensuite, sur des distances comprises entre 300 m et un marathon (42,195 km), *« on parle d'un effort d'intensité moyenne sur une durée moyenne. Le corps utilise alors comme combustible le glycogène* [un glucide complexe] *qu'il a en stock, soit deux mille calories, qui lui permet de tenir trois heures environ. »*

Sur cette distance peut se manifester le fameux « second souffle », phénomène qui survient entre la 10e et la 30e minute d'effort. Il est dû à la sécrétion, en réaction à la douleur induite, d'une endorphine (morphine générée par l'organisme), qui envoie un message bienveillant à notre cerveau. Ainsi, douleur et stress s'atténuent-ils ; le coureur contrôle mieux sa respiration et ressent même un certain plaisir.

L'ultra-trail, quant à lui, *« se classe parmi les efforts moins intenses, mais très longs*, poursuit le docteur Vauthier. *L'athlète puise alors dans son "gras", une ressource quasi infinie de cent quarante mille calories que chacun possède, même les plus minces ! »*

Lors de l'épreuve, *« le corps lipolyse, c'est-à-dire brûle du gras*, poursuit le médecin. *Sur cette phase de basse intensité, on peut tenir longtemps. François D'Haene* [meilleur ultra-traileur français] *a par exemple la capacité de passer rapidement, au bout de quatre ou cinq heures, en mode lipolyse. »*

D'où l'aisance souriante constatée chez cet athlète après cinq ou six heures de course. *« C'est pour cela qu'il gagne ! »*

Pas de prédisposition respiratoire particulière

Au niveau ventilation, l'ultra-trail ne nécessite pas, non plus, de prédisposition respiratoire particulière. *« On est sur des durées d'effort qui ramènent à la vie normale. Le coureur est environ à 60 % de ventilation et suit une respiration classique, ventrale diaphragmatique, souple et détendue. »*

Théoriquement, tout un chacun est ainsi capable de courir un ultra-trail au bout de trois ou cinq ans d'entraînement – tout de même.

L'ultra-trail s'apparente donc à une activité quasi normale. Les dernières recherches d'un groupe de médecins vosgiens, parmi lesquels le docteur Vauthier, vont dans ce sens. Ils ont étudié l'incidence de la course à pied sur les reins et ont démontré que, si ces organes souffrent lors de « runs » ou de marathons, ils ont une activité *« normale »* lors d'ultra-trails.

Ce qui fait dire à Jean-Charles Vauthier que courir un ultra-trail, *« c'est juste un boulot »*,

POURQUOI CET ARTICLE ?

L'ultra-trail est une compétition sportive en milieu naturel, de difficulté variable et longue d'au moins 80 km. Il existe de nombreux ultra-trails à travers le monde, qui connaissent un succès important depuis plusieurs années, comme celui du mont Blanc, long de 171,6 km et dont le dénivelé cumulé est d'environ 10 000 m. **Cet article vise à remettre en cause l'idée selon laquelle l'ultra-trail ne serait réalisable que par des sportifs d'exception.** Selon cet article, l'ultra-trail peut être pratiqué par un grand nombre de personnes, car il alterne moments de course, de trotte et de marche, en fonction du relief et des difficultés du terrain. L'ultra-trail constitue un effort très long, mais d'intensité modérée. Ce type d'effort est réalisé grâce à un métabolisme spécifique, caractérisé par une forte utilisation des réserves lipidiques et qui n'exige pas une oxygénation (et donc une ventilation) trop importante. Mais, comme tout effort physique, un entraînement de qualité est nécessaire pour réaliser, dans de bonnes conditions physiques et morales, ces épreuves d'endurance en pleine nature.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

un travail physique, comme ouvrier sur un chantier, paysan ou artisan maçon. *« Ce n'est pas si délirant que ça ! Il faut juste trouver un rythme compatible avec la durée. »*

Encore faut-il préciser le mot « course ». En ultra-trail, on ne « court » pas, on « trotte ». *« Plus c'est long, plus on trotte*, s'amuse le docteur Vauthier. *Sur 269 km* [son dernier trail]*, en réalité, on marche dans les descentes, on marche dans les montées et on trottine sur le faux plat.* [Beaucoup courent en réalité en descente*] On fait des pauses toutes les trois ou quatre heures. On mange. On s'arrête même pour dormir – on a le droit ! – des minisiestes de sept minutes dans l'idéal, de trente minutes au maximum. Il nous arrive aussi de sortir l'appareil photo, devant un panorama fabuleux. »*

Pas plus de risque d'addiction que dans d'autres sports

L'ultra-trail ne donne pourtant pas l'image du sport *« pépère »*, décrit par Jean-Charles Vauthier. Les scènes d'épuisement y sont légion. *« Mais là encore l'ultra-trail est ambivalent*, précise le docteur, *c'est une douleur qui fait du bien, une sensation que l'on a envie de retrouver »*, grâce à la fameuse endorphine.

N'y a-t-il pas en ce cas risque d'addiction ? Le docteur Vauthier réfute cette rumeur persistante. *« Surtout pas ! Seuls 4 % des traileurs sont addicts, ce qui est la même proportion que dans tous les autres sports. »*

Reste l'inexplicable. Lors de l'UTMB 2017, le vainqueur, François D'Haene, a couvert les 167 km et 9 618 m de dénivelé à la vitesse moyenne de 8,8 km/h ; à la mi-juin, l'Américain Jim Walmsley bouclait les 166 km de la Western State en 14 h 30 min, soit à 11,4 km/h de moyenne.

« L'être humain est naturellement endurant, commente M. Vauthier. Mais pour atteindre cette vitesse, il faut une prédisposition génétique. D'Haene ou Walmsley sont des ovnis ! »

Catherine Pacary,
Le Monde daté du 31.08.2018

Myopathies : la longue marche des essais cliniques

Du 14 au 18 mars, à Lyon, s'est tenu le congrès annuel de l'Association française contre les myopathies

Lyon, envoyée spéciale

En 1986, on découvrait le gène de la myopathie de Duchenne, la plus fréquente des maladies neuromusculaires touchant les garçons – un sur 3 500 à la naissance. En 1987, le premier Téléthon était lancé. Trente ans plus tard, où en est la recherche de traitements ciblant les anomalies génétiques responsables de ces affections ?

L'Association française contre les myopathies (AFM)-Téléthon organisait son 5e congrès international, Myology 2016, du 14 au 18 mars à Lyon. Un rassemblement marqué, pour l'AFM, *« par les avancées thérapeutiques, la multiplication des essais cliniques et les premiers médicaments engagés sur la voie de l'autorisation de mise sur le marché (AMM) »*. Mais dans cet âpre combat, la ligne de front apparaît mouvante, tiraillée entre percées et replis. Le précédent congrès de l'AFM, en 2011, fut le théâtre d'une annonce retentissante : pour la première fois, une forme de thérapie génique administrée par injections multiples semblait ralentir l'évolution de la myopathie de Duchenne chez une douzaine de malades âgés de 5 à 15 ans. Un essai clinique « de phase 3 » a ensuite permis d'évaluer cette molécule, le drisapersen, chez près de 300 patients. Mais, en janvier, les résultats de cet essai n'ont pas convaincu l'Agence du médicament américaine (FDA), qui a retoqué la demande d'AMM. *« Le rapport des bénéfices du drisapersen et de ses risques n'a pas été jugé suffisant »*, résume Serge Braun, directeur scientifique de l'AFM.

Dès la petite enfance, la myopathie de Duchenne se manifeste par une faiblesse musculaire, qui progresse vers une perte de la marche et un handicap majeur. Elle résulte d'une des mutations d'un gène situé sur le chromosome X. Ce gène code une protéine, la dystrophine, indispensable à la résistance aux contractions des cellules musculaires et cardiaques. Le drisapersen est une molécule dite « anti-sens », capable d'inactiver partiellement le gène malade, restaurant la production d'une protéine tronquée, mais fonctionnelle. Cette approche anti-sens pourrait concerner 60 % à 70 % des patients atteints.

D'autant qu'arrive une seconde génération d'anti-sens, fondés sur une chimie très différente. *« Un concurrent du drisapersen, l'eteplirsen, semble un peu plus efficace et beaucoup moins toxique que ce premier prototype »*, résume Serge Braun. Mais dans un premier avis, en janvier, la FDA s'est aussi montrée réticente.

Les leçons de ces revers ont été analysées à Lyon. *« Il y a eu de nombreuses erreurs dans la construction des essais cliniques avec le drisapersen »*, estime Laurent Servais, neuropédiatre, qui déclare un lien d'intérêt avec Biomarin, la société qui développe cette molécule. Il codirige l'institut I-Motion, consacré aux essais cliniques de thérapies innovantes pour les maladies neuromusculaires, créé en 2015 à l'hôpital Trousseau, à Paris. Le professeur Lee Sweeney, de l'université de Floride, a ainsi pointé le manque

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

d'homogénéité des patients inclus dans ces essais et les biais des critères d'évaluation. *« Un de ces critères, le périmètre de marche parcouru en six minutes, dépend de la motivation des patients*, indique Laurent Servais. *Nous développons un outil plus fiable, qui enregistre en continu la mobilité des patients, à domicile. »*

Une approche prometteuse

« L'approche anti-sens reste prometteuse. L'amélioration n'est pas spectaculaire, mais les molécules actuellement testées ont été mises au point il y a une dizaine d'années. Depuis, la chimie a fait des progrès », estime Luis Garcia (Inserm-université Versailles-Saint-Quentin). Les stratégies de thérapie génique ont d'abord suscité un enthousiasme débordant, avant de subir une mise à l'index. Pionnier du domaine, Luis Garcia cherche à faire produire les anti-sens par les cellules musculaires des patients, à l'aide de vecteurs viraux injectés en une fois – au lieu de fournir des anti-sens synthétiques par des injections répétées.

POURQUOI CET ARTICLE ?

La myopathie de Duchenne est la myopathie la plus fréquente : elle se caractérise par une faiblesse musculaire responsable d'importantes difficultés à effectuer des mouvements. Il s'agit d'une maladie génétique, caractérisée par une anomalie au niveau d'une protéine, la dystrophine, et qui affecte essentiellement les garçons. **Cet article présente les difficultés que rencontre la recherche biomédicale à obtenir des traitements efficaces de la myopathie de Duchenne, alors que les connaissances sur cette maladie se sont grandement étoffées depuis plus d'une trentaine d'années.** En effet, depuis 1987, l'Association française contre les myopathies organise le Téléthon, qui promeut la recherche biomédicale contre ces maladies. Ces dernières années, plusieurs essais cliniques faisant appel à différentes stratégies thérapeutiques ont été déployés, mais les bilans entre les bénéfices et les risques de ces traitements ne se révèlent pas assez favorables. Certaines approches innovantes, comme l'approche anti-sens qui vise à bloquer l'expression d'un allèle malade, pourraient être prometteuses. Aujourd'hui, la mise au point de traitements efficaces de la myopathie de Duchenne reste encore à concrétiser.

« Chaque fois qu'on pense avoir résolu un problème, un autre se pose », observe le professeur Laurent Schaeffer, qui dirige l'Institut NeuroMyoGene (INMG), créé en janvier 2016 à Lyon par le CNRS, l'Inserm et l'université Lyon-I. Sa vocation : créer des synergies entre experts des neurones et des cellules musculaires. *« Les neurones et les cellules musculaires partagent des caractéristiques essentielles. Par exemple, ces cellules ne se divisent plus : elles doivent être plastiques pour s'adapter aux changements d'environnement au cours de la vie, et capables de maintenir leur génome stable sur de longues périodes. »* Un retour aux fondamentaux, pour comprendre ces maladies et identifier de nouvelles cibles et armes potentielles.

Florence Rosier,
Le Monde daté du 23.03.2016

Des souris sédentaires se muent en marathoniennes

Physiologie – Une molécule induisant l'utilisation des lipides par le muscle a augmenté les performances des rongeurs de 70 %

Avalera-t-on un jour un comprimé pour améliorer son endurance sans même avoir à s'entraîner physiquement ? C'est ce que pourraient laisser présager des travaux sur des souris publiés le 2 mai dans la revue Cell Metabolism. L'équipe de Ronald Evans du Salk Institute à La Jolla (Californie) a ajouté la molécule GW501516 (ou GW) à la nourriture de rongeurs. Ceux-ci ont pu courir sur un tapis roulant environ cent minutes de plus que des souris non traitées.

Le GW active spécifiquement PPARδ (PPAR delta), une protéine située dans le noyau des cellules des muscles squelettiques. PPARδ se fixe alors à des séquences particulières de l'ADN, ce qui déclenche le fonctionnement de certains gènes.

L'étude des chercheurs californiens s'inscrit dans la continuité de recherches menées au début des années 2000. Cette équipe avait créé en 2004 des souris génétiquement modifiées exprimant PPARδ dans le muscle. Ces rongeurs transgéniques étaient capables de courir deux fois plus longtemps que des souris normales. La plus grande endurance de ces « souris marathoniennes » tient au fait qu'elles développent préférentiellement certaines fibres musculaires.

Un effet purement métabolique

Rappelons que les muscles sont composés de deux types de fibres : des fibres oxydatives lentes (de type I) qui utilisent des lipides et des glucides comme source d'énergie et des fibres glycolytiques rapides (de type II) qui, elles, consomment du glucose. Les premières sont résistantes à la fatigue et sont impliquées dans l'endurance tandis que les fibres de type II sont peu résistantes à la fatigue mais permettent de générer rapidement beaucoup de force. *« Un cycliste ou un marathonien*

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

utilise préférentiellement des fibres de type I, alors qu'un haltérophile a plus recours aux fibres de type II pour produire beaucoup de force en très peu de temps », explique Cédric Moro, chargé de recherche à l'Institut des maladies métaboliques et cardio-vasculaires de Toulouse.

Pour en revenir aux souris marathoniennes qui expriment donc PPARδ dans les muscles après manipulation génétique, leur endurance repose sur une plus grande production de fibres de type I que de fibres de type II ainsi que sur la production dans le tissu musculaire d'un plus grand nombre de mitochondries, ces organites jouant le rôle de centrales énergétiques.

En 2008, l'équipe californienne avait montré que des souris recevant du GW présentaient un gain en endurance mais seulement lorsqu'on les entraînait en même temps à courir. Les dernières expériences menées par les chercheurs du Salk Institute ont consisté à administrer par voie orale le GW pendant une période deux fois plus longue (huit semaines au lieu de quatre) et à une dose huit fois plus importante. Le GW s'est alors montré capable d'améliorer l'endurance des rongeurs sans même un entraînement physique préalable, avec un gain de 70 % des performances.

Les chercheurs ont constaté que les souris devenues très endurantes sous l'effet du GW (qui stimule PPARδ) ne présentent pas les mêmes caractéristiques que les souris marathoniennes génétiquement manipulées pour constamment produire PPARδ dans leurs muscles : elles ne montrent pas de changement de composition des fibres musculaires, ni même une grande quantité de mitochondries. Il s'avère que l'effet du GW est purement métabolique. Cette petite molécule stimule dans le muscle l'utilisation des lipides par les mitochondries tout en diminuant celle du glucose.

Dès lors, une plus grande quantité de glucose se trouve disponible pour d'autres organes, dont le cerveau. Contrairement aux souris non traitées, celles qui ont reçu du GW parviennent, du fait de cette moindre utilisation de glucides par le muscle, à maintenir une glycémie normale plus longtemps. Ceci retarde le moment où la glycémie passe sous la barre des 70 mg/dl, autrement dit celui où la souris s'arrête brutalement de courir et perd connaissance. Lorsque les chercheurs ont perfusé du glucose pour faire remonter la glycémie des souris épuisées par l'effort, celles-ci ont réussi à courir de nouveau pendant vingt minutes. Le glucose sanguin joue donc un rôle majeur dans l'endurance. *« Le moment où les souris ne peuvent plus courir correspond au moment où le marathonien "bute contre le mur" qui se dresse à partir du 30e kilomètre du fait de l'épuisement des réserves en glucose. C'est également l'instant où le cycliste de haut niveau ressent, sans aucun signe annonciateur, "le coup de marteau", expression utilisée pour qualifier une défaillance physique totale »*, indique le professeur Bart Staels, de la faculté de pharmacie de l'université de Lille-II.

Marché noir et Internet

L'utilisation chez le sportif du GW pour augmenter l'endurance relèverait évidemment du dopage. Cette molécule avait initialement été développée par GlaxoSmithKline qui espérait en faire un médicament contre l'obésité et le diabète, les souris transgéniques PPARδ répondant mieux à l'insuline. Son développement a été interrompu du fait de la survenue de certains cancers chez le rat et la souris. Le GW a été classé en 2009 comme produit dopant par l'Agence mondiale antidopage, de même que d'autres composés activant PPARδ. Le GW est vendu sur le marché noir et sur Internet.

« Une pilule ne réussira pas à reproduire tous les effets bénéfiques de l'exercice physique liés à la contraction musculaire, notamment la production de substances capables d'améliorer la fonction d'organes à distance. On est encore loin de transformer un individu restant assis sur son canapé en bête de course », assure Cédric Moro. D'autant que *« l'endurance est aussi conditionnée par la génétique. Un sujet porteur d'un rare variant du gène PPARδ ne pourra pas améliorer sa fonction mitochondriale malgré un entraînement physique »*, ajoute le professeur Bart Staels. Pas sûr que cela suffise à freiner la course de tricheurs cherchant à se procurer des agonistes PPARδ. Certains pourraient même un jour être tentés par le dopage génétique qui consisterait à introduire dans les cellules musculaires un gène gouvernant la production d'une forme active de PPARδ afin d'améliorer leur endurance.

Marc Gozlan,
Le Monde daté du 10.05.2017

POURQUOI CET ARTICLE ?

Cet article relate comment l'ajout d'une molécule appelée GW à l'alimentation de banales souris de laboratoire les transforme en marathoniennes accomplies. En effet cet article présente les résultats d'une étude américaine, dans laquelle la protéine GW est donnée à consommer à des souris. Les souris, qui doivent alors courir sur un tapis roulant, voient la durée de leur course d'endurance doubler par rapport aux souris témoins n'ayant pas ingéré cette molécule. L'équipe responsable de l'étude avait montré auparavant que des souris modifiées génétiquement présentaient de meilleures performances en endurance, car elles développaient davantage des fibres musculaires de type I, qui étaient notamment plus riches en mitochondries. Dans l'étude actuelle, l'absorption de la molécule GW est responsable d'un effet uniquement métabolique. Cette protéine modifie indirectement l'expression de certains gènes, ce qui accroît la consommation de lipides par les fibres de type I, et donc retarde la baisse marquée de la glycémie observée normalement lors d'un effort prolongé d'endurance. De par ses effets, la molécule GW a été bien évidemment classée comme produit dopant.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Dopage : les « microdoses » d'EPO de mieux en mieux détectées

Le laboratoire français antidopage dit être en mesure de détecter les « microdoses » d'EPO jusqu'à quarante-huit heures après la prise, contre vingt-quatre aujourd'hui. Mais la méthode doit encore être validée par l'AMA.

Vingt ans après avoir élaboré le premier test de détection de l'érythropoïétine (EPO), la molécule qui a bouleversé le sport des années 1990, le laboratoire de Châtenay-Malabry pense avoir trouvé un moyen de mieux détecter les « microdoses » d'EPO.

Le directeur du laboratoire, Michel Audran, en a fait l'annonce jeudi 13 juin lors d'une conférence de presse au siège de l'Agence française de lutte contre le dopage (AFLD) : *« Nous pouvons détecter des microdoses d'EPO un minimum de quarante-huit heures après la prise, tandis qu'on arrive aujourd'hui difficilement à vingt-quatre heures. »*

Les microdoses, qui doivent être répétées tous les deux jours pour être efficaces, sont réputées être utilisées depuis la mise au point du premier test de détection de l'EPO, pour passer en dessous des radars. Il y a une dizaine d'années, la prise après 23 heures – heure limite des contrôles antidopage – permettait de ne plus laisser de trace après six heures du matin. La chasse à l'EPO est donc de plus en plus efficace.

Effectif en 2020 ?

Une nuance, de taille : la méthode n'a pas encore été validée par l'Agence mondiale antidopage (AMA), qui supervise les 31 laboratoires accrédités dans le monde. Elle ne pourra donc pas être utilisée cet été, notamment sur le Tour de France.

La nouvelle technique de détection a fait l'objet d'une étude clinique menée par le laboratoire de Châtenay-Malabry, permettant de constater que des microdoses d'EPO – moins de 10 unités internationales par kilo, soit 600 UI pour un sportif de 60 kg – pouvaient être décelées quarante-huit heures après la prise.

Elle doit maintenant être testée par d'autres laboratoires avant d'être présenté au « groupe d'experts laboratoire » de l'AMA, qui devra ensuite éditer un *« document technique »* afin que chaque laboratoire puisse l'utiliser. Un long cheminement qui devrait mener jusqu'au début de l'année 2020.

Les adeptes des microdoses devront toutefois rester prudents d'ici à l'adoption de cette nouvelle méthode : l'AFLD rappelle qu'une partie des échantillons prélevés sont conservés et peuvent faire l'objet de réanalyses une fois qu'elle aura été autorisée.

L'EPO n'est plus le dopant principal

Les experts de l'antidopage estiment que les microdoses d'EPO font partie de l'arsenal encore utilisé par les tricheurs, notamment pour maintenir des valeurs sanguines élevées que l'on a préalablement fait monter artificiellement.

« La pratique peut être de se faire des transfusions sanguines pendant quinze jours, de revenir en course avec une hémoglobine élevée et de maintenir les niveaux avec des microdoses d'EPO », nous disait l'an dernier Michel Audran. Il confirme aujourd'hui : *« Il est important de passer de vingt-quatre à quarante-huit heures de détection, car dans ces protocoles, on estime que les tricheurs font des microdoses tous les deux jours. »*

L'ampleur des conséquences de cette avancée scientifique doit toutefois être relativisée. Les chercheurs soupçonnent qu'il sera bientôt possible de faire sécréter naturellement davantage d'érythropoïétine. Et la récente opération de police « Aderlass », partie d'Allemagne et d'Autriche, a montré la permanence des transfusions sanguines dans le sport de haut niveau.

Enfin, le dopage hormonal reste très prisé, y compris la testostérone, vieille comme le « doping ». La multitude d'hormones disponibles sur le marché multiplie de fait les trous dans la passoire. ●

Clément Guillou,
Le Monde daté du 14.06.2019

POURQUOI CET ARTICLE ?

L'EPO ou érythropoïétine est une hormone qui stimule la production des cellules précurseurs des globules rouges au niveau de la moelle osseuse. Elle constitue un médicament utilisé notamment pour traiter les anémies, mais elle est également largement utilisée comme produit dopant, puisqu'elle permet l'augmentation du nombre d'hématies dans le sang, accroissant ainsi l'oxygénation des tissus musculaires et améliorant la performance sportive. **Cet article présente les progrès réalisés par le dans la détections des microdoses d'EPO.**

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Bouger pour contrer le diabète

Connaissez-vous le meilleur traitement contre le diabète ? De nombreuses études ont démontré ses effets bénéfiques sur l'équilibre glycémique des diabétiques de type 2. Des effets comparables à ceux des médicaments, voire plus efficaces, et ce sans effets secondaires ! Il s'agit de l'activité physique, qui peut même retarder la survenue du diabète de type 2, voire l'empêcher. Cela fait dix ans que Jonathan (le prénom a été changé), 45 ans, a été diagnostiqué « à risque » dans le développement d'un diabète, comme ses parents avant lui. Depuis, il pratique 3 ou 4 fois par semaine marche, natation, sport en salle avec machine elliptique… *« Ma glycémie n'a quasiment pas bougé. De plus, mon état de santé s'est amélioré. »*

C'est là un enjeu majeur quand on sait que plus de 3 millions de personnes en France sont touchées, à 90 % par le diabète de type 2, et moins fréquemment par le diabète de type 1 – qui apparaît le plus souvent de manière brutale chez l'enfant ou chez le jeune adulte, et est caractérisé par une production insuffisante d'insuline, hormone sécrétée par le pancréas.

Non traitée, la maladie peut engendrer des complications graves (cardio-vasculaires, rénales, ophtalmiques…). Dans le diabète de type 2, qui résulte de multiples facteurs faisant intervenir gènes, environnement et comportement, le système de régulation de l'assimilation du sucre ne fonctionne plus. Mais, lors de l'activité physique, l'exercice musculaire augmente la sensibilité à l'insuline. Ce n'est pas tout. L'effort augmente aussi l'oxydation des acides gras, est associé à une amélioration du profil tensionnel, du contrôle lipidique… C'est un facteur de réduction du risque cardio-vasculaire à part entière. Des effets amplifiés lorsque l'exercice est associé à une bonne hygiène alimentaire. Et peu importe le niveau de départ et l'âge auquel on démarre.

Des études ont également montré que marcher au moins une demi-heure après le repas favorise la remise à niveau de la glycémie. Les recommandations sont proches de celles proposées pour la population générale (au moins 150 minutes d'activité modérée par semaine). *« La combinaison d'une activité d'endurance et de renforcement musculaire semble avoir un bénéfice plus important »*, ajoute le professeur Jean-Michel Oppert (hôpital la Pitié-Salpêtrière, AP-HP). Cela peut être aussi une activité plus modérée pour des personnes diabétiques en situation d'obésité. Car l'association inactivité physique et sédentarité importante (temps passé assis) a des effets plus délétères encore sur la santé.

L'activité physique *« permet une réduction de 50 % en moyenne de l'incidence du diabète de type 2 sur une période de quinze à vingt ans »*, indique la professeure Martine Duclos, chef du service de médecine du sport au CHU de Clermont-Ferrand. *« L'enjeu est donc de détecter les personnes à risque, les enfants dont les parents, les grands-parents sont diabétiques, en surcharge pondérale… »*, souligne Gérard Raymond, président de la Fédération française des diabétiques. Ainsi l'Assurance-maladie démarre-t-elle un programme dans trois départements (Bas-Rhin, La Réunion, Seine-Saint-Denis) sur des populations à haut risque.

Peu de patients diabétiques ont un niveau d'activité physique suffisant. Le vrai défi est de les convaincre de franchir le pas… *« Il faut travailler sur des recommandations personnalisées, adaptées à l'environnement socio-économique, au mode de vie »*, note le chercheur Guy Fagherazzi (Inserm). Les objets connectés, le e-coaching… peuvent aider. S'agissant du diabète de type 1, l'activité physique est maintenant elle aussi indiquée. La révolution de l'auto-surveillance en continu, grâce à de nouveaux capteurs de glycémie, peut faciliter ces pratiques. Quant à Jonathan, le sport est devenu pour lui une priorité : *« Le week-end, je commence par ça et je vois ensuite si j'ai le temps de faire autre chose. »*

Pascale Santi,
Le Monde daté du 22.11.2017

POURQUOI CET ARTICLE ?

Le diabète, caractérisé par une hyperglycémie chronique, affecterait au total en France environ 4,5 millions de personnes, soit près d'une personne sur 10. La majorité des individus diabétiques sont atteints du diabète de type 2, caractérisé par une baisse de la sensibilité à l'insuline, une hormone pancréatique hypoglycémiante. Plusieurs types de traitements permettent de prendre en charge le diabète de type 2, afin de limiter l'hyperglycémie et ses conséquences dommageables pour l'organisme. **Cet article établit que l'un des meilleurs traitements actuels contre le diabète de type 2 est la pratique régulière d'une activité physique.** En effet, l'activité physique contribue à augmenter la sensibilité à l'insuline des cellules de l'organisme et présente d'autres bénéfices pour la santé, sans entraîner d'effets secondaires. Ainsi, la pratique d'une activité physique régulière retarde l'apparition du diabète chez les personnes présentant un début d'insulino-résistance et limite le développement ultérieur du diabète. Il reste à favoriser la prise en charge et l'accompagnement personnalisé des patients dans la pratique d'une activité physique régulière, adaptée et plaisante.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Le diabète bientôt à l'heure du pancréas artificiel

Un dispositif français en cours d'essai clinique pourrait être proposé aux diabétiques insulinodépendants d'ici à trois ans

C'est un message d'espoir pour les diabétiques de type I mal équilibrés par leurs injections d'insuline. Des pancréas artificiels (quasi) autonomes devraient être disponibles dans les deux à trois ans à venir. Un dispositif français, Diabeloop, est ainsi en cours d'essais cliniques dans dix CHU, et il pourrait obtenir l'agrément européen en 2017 ou 2018, ont annoncé ses concepteurs mardi 8 mars lors d'une conférence de presse à Paris. Des systèmes proches, développés par les sociétés américaines Medtronic et Bigfoot, sont attendus dans les mêmes délais.

L'idée d'un pancréas artificiel pour suppléer la production défaillante d'insuline est loin d'être nouvelle : des premiers prototypes avaient été conçus dès les années 1970. Ces appareils étaient efficaces, mais leur encombrement – de l'ordre d'un réfrigérateur – n'était guère compatible avec une vie normale.

La longue marche vers un pancréas de substitution ergonomique et autonome s'est faite grâce à trois avancées technologiques. Il y a d'abord eu l'arrivée de pompes à insuline portables, depuis une vingtaine d'années. Aujourd'hui, en France, plus de 40 000 personnes en sont équipées, soit 20 % des diabétiques de type I.

La deuxième étape importante a été la mise au point de petits capteurs (de type patchs) mesurant en continu le taux de glucose sous la peau, ce qui évite aux patients de se piquer plusieurs fois par jour au bout du doigt. En combinant pompe et capteur, on obtient un système dit « en boucle ouverte » qui facilite la vie des diabétiques, mais il leur incombe toujours de déterminer la dose d'insuline à délivrer.

Pour fermer la boucle, et disposer d'un véritable pancréas artificiel autonome, les chercheurs planchent sur un troisième élément essentiel : un algorithme, système d'intelligence artificielle permettant de programmer la pompe. Hier contenus dans un ordinateur, les logiciels sont désormais intégrés à un smartphone.

Depuis une dizaine d'années, plusieurs études cliniques ont été menées par des équipes internationales, avec différents algorithmes. *« L'une des étapes-clés a été la réalisation de premiers essais chez des patients en dehors de l'hôpital, en 2011*, souligne le professeur Eric Renard (coordinateur du département endocrinologie, diabétologie, nutrition au CHU de Montpellier), qui a participé à cette étude, conduite également à Padoue, en Italie. *Plus récemment*, poursuit-il, *un projet développé par l'université de Cambridge a testé avec succès un modèle de pancréas artificiel sur une durée de trois mois, 24 heures sur 24. »*

Le système français Diabeloop a été lancé en 2011 par une association, le Centre d'études et de recherches pour l'intensification du traitement du diabète (CERITD), en collaboration avec le LETI (Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information), une division du Commissariat à l'énergie atomique. Le financement est mixte, public-privé, et des levées de fonds sont toujours en cours.

Connecté par Bluetooth

Comme ses concurrents, ce pancréas artificiel est constitué de trois éléments : un capteur, un logiciel et une pompe. L'appareil de mesure en continu du glucose, placé sur le ventre, est connecté par Bluetooth à un smartphone, qui détermine les doses d'insuline en fonction de paramètres propres au patient (poids, âge, historique glycémique…). Les données sont transmises à une pompe patch à insuline, portée sur le bras.

Le prototype actuel n'est cependant pas encore complètement autonome. *« Les patients doivent renseigner leurs repas, et les activités physiques qu'ils prévoient. Mais à terme, tout devrait être automatisé »*, affirme le docteur Guillaume Charpentier, président du CERITD et de Diabeloop, en rappelant qu'en France, 50 % des diabétiques de type I ne sont pas équilibrés par leur traitement. *« L'originalité du pancréas artificiel français est qu'il ne s'agit pas uniquement d'une machine, mais aussi d'un service. Les données sont envoyées à des infirmières et des médecins, ce qui permet un suivi à distance »*, ajoute le diabétologue.

Outre l'évaluation en cours en CHU, avec essais « en vie réelle » pendant trois jours, le système Diabeloop sera soumis, en 2017, à une nouvelle étude incluant 100 patients, qui le porteront à domicile pendant trois mois. Le dispositif sera alors présenté pour un marquage CE. Ses concepteurs espèrent ensuite démontrer sa supériorité sur les autres traitements existants, pour obtenir une prise en charge par l'Assurance-maladie. Le coût devrait être de l'ordre de 9 500 euros par an et par patient, environ 10 % de plus qu'une pompe à insuline. Quant aux bénéfices, Diabeloop pourrait éviter 10 000 hospitalisations et 1 000 décès par an, espèrent ses concepteurs. Les patients, de leur côté, sont enthousiastes. Plus de 83 % déclarent vouloir en bénéficier, selon une enquête de la Fédération française des diabétiques. ●

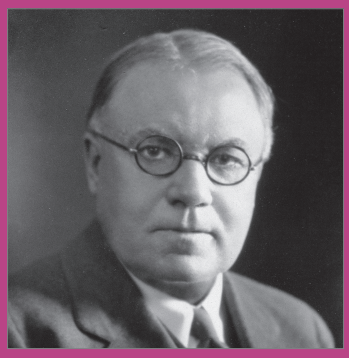
Sandrine Cabut,
Le Monde daté du 16.03.2016

POURQUOI CET ARTICLE ?

Cet article fait le point sur les progrès réalisés ces dernières années sur la prise en charge du diabète de type 1, qui ont contribué à l'amélioration de la santé et de la vie quotidienne de ces diabétiques. Ainsi, des capteurs de glycémie similaires à des patchs facilitent la mesure de la glycémie, et les pompes à insuline portables permettent une meilleure régulation de celle-ci. Un progrès important est en cours de réalisation : la mise en communication, par un logiciel, des informations récoltées par les capteurs de glycémie et la commande d'une pompe à insuline.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

COMPORTEMENTS ET STRESS : VERS UNE VISION INTÉGRÉE DE L'ORGANISME



© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

L'adaptabilité de l'organisme et ses limites

L'organisme vit au sein d'un environnement dont les conditions sont changeantes. Lors d'une modification brutale d'un facteur de l'environnement (modification d'un paramètre physico-chimique comme la température, présence d'un danger, etc.), l'organisme réagit en déclenchant un ensemble de réponses adaptatives qui lui permettent de produire un comportement répondant à la situation. L'ensemble de ces réponses adaptatives constitue un stress biologique. Lorsqu'il est limité dans le temps, il est qualifié de stress aigu. Quels sont les mécanismes biologiques permettant à l'organisme de produire des réponses adaptées lors d'un stress aigu ? Comment réagit l'organisme lorsque le stress se prolonge dans le temps ?

L'adaptabilité de l'organisme lors d'un stress aigu

Une perturbation de l'environnement peut constituer un **agent stresseur**. Celui-ci est à l'origine d'un ensemble de réactions chez l'individu, appelé **stress biologique**. Les réactions qu'il cause permettent à l'individu de produire un comportement adapté à la perturbation à l'origine de ce stress. Les agents stresseurs peuvent être physiques (s'ils occasionnent une contrainte importante sur le corps) ou psychologiques (s'il s'agit de situations que l'individu interprète comme dangereuses pour lui, qu'elles le soient objectivement ou non). Lors de la survenue dans l'environnement d'un agent stresseur, sa nocivité et la possibilité d'y faire face sont évaluées lors de processus cognitifs et émotionnels. Ces processus présentent une **forte variabilité individuelle** et sont à l'origine de la diversité des réponses selon les individus lors d'une même situation stressante.

Dès que l'agent stresseur est perçu, le **système limbique** est stimulé. Il s'agit de la région du cerveau contenant **l'hippocampe** et **l'amygdale,** impliquée dans les émotions, le comportement et la mémoire. Très rapidement, le système limbique module l'activité du système nerveux autonome qui déclenche la sécrétion d'hormones du groupe des catécholamines, par la glande **médullosurrénale**. La principale hormone qu'elle sécrète est **l'adrénaline**. La glande surrénale est une glande endocrine, située au-dessus de chaque rein. Elle comporte une partie centrale (appelée médullosurrénale) de nature nerveuse, qui produit les hormones catécholamines, et une partie périphérique (appelée corticosurrénale), qui produit d'autres hormones, les glucocorticoïdes.

Un peu plus tard, en présence d'un agent stresseur, la stimulation des neurones de **l'hypothalamus** déclenche la sécrétion de **CRH** (*Corticotropin Releasing Hormone*). La CRH agit en particulier sur **l'hypophyse antérieure**, une glande endocrine située sous l'hypothalamus et qui sécrète alors l'hormone **ACTH** (*Adeno Cortico Tropic Hormone*). La CRH agit ici en tant que **neurohormone**, car elle est libérée par les neurones de l'hypothalamus et agit sur les cellules de l'hypophyse antérieure. L'ACTH, sécrétée par l'hypophyse antérieure dans le sang, stimule la sécrétion de **cortisol** (hormone de type glucocorticoïde) par la **corticosurrénale**. La libération de cortisol, qui a lieu quelques minutes après le début du stress aigu, est donc postérieure à la sécrétion d'adrénaline.

Lors du stress aigu, l'adrénaline entraîne une **augmentation du rythme cardiaque**, de la **fréquence respiratoire** et de la **libération de glucose dans le sang.** Les effets rapides de l'adrénaline permettent à l'organisme d'être prêt physiologiquement à répondre à la situation à l'origine du stress. L'individu vivant ce stress aigu peut percevoir ces modifications physiologiques (notamment l'augmentation du rythme cardiaque), et peut ressentir de l'anxiété. La libération plus tardive du cortisol stimule la **production de glucose** à partir du glycogène, favorisant

PERSONNAGES CLÉS

WALTER BRADFORD CANNON (1871-1945)

Médecin et physiologiste américain, qui a développé le concept d'homéostasie (ensemble des réactions physiologiques qui, par des équilibres dynamiques, visent à maintenir constantes les caractéristiques internes de l'organisme) à la suite des travaux de Claude Bernard. Il a mis en en évidence la sécrétion d'adrénaline après à une émotion violente, et a travaillé sur les liens entre le psychisme et la physiologie.

HANS SELYE (1907-1982)

Médecin et physiologiste québécois d'origine hongroise, qui a défini la notion de stress et a proposé la théorie du syndrome général d'adaptation (suite à une agression, l'individu réagit selon 3 étapes successives : la phase d'alarme, la phase de résistance et la phase d'épuisement si la cause du stress se maintient).

ZOOM SUR…

LE SYNDROME DE CUSHING

Le syndrome de Cushing est un ensemble de symptômes occasionnés par un excès de sécrétion du cortisol, ayant comme origine une anomalie au niveau de la glande corticosurrénale ou au niveau de l'hypophyse. Ce syndrome se traduit notamment par une obésité de la partie supérieure du corps. Il s'agit d'une maladie rare, dont l'incidence (nombre de nouveaux cas dans une population étudiée sur un temps donné) est estimée à 1 cas par an pour un million d'habitants. Le syndrome de Cushing est une maladie grave, qui peut être mortelle mais qui, dans la très majorité des cas, peut être traitée de façon efficace, avec même une possible guérison définitive.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

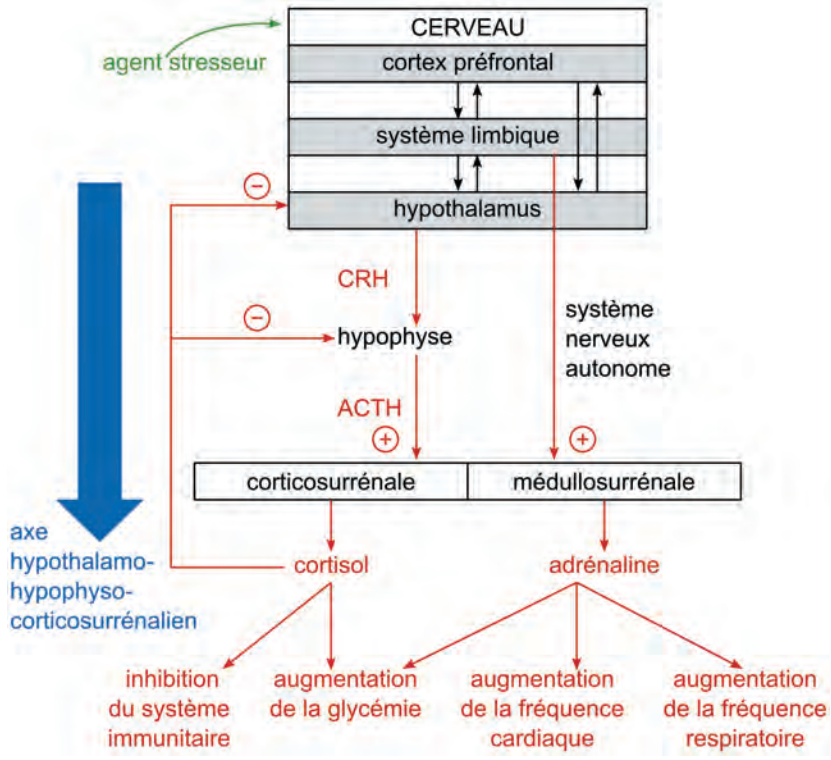
l'augmentation de la glycémie. Le cortisol a plusieurs autres actions ; en particulier, il est responsable d'une **inhibition du système immunitaire** caractérisée par une réduction du nombre de lymphocytes, une diminution de l'activité des certaines cellules immunitaires, ainsi qu'un effet anti-inflammatoire. De plus, le cortisol exerce un **rétrocontrôle négatif sur l'axe hypothalamo-hypophyso-corticosurrénalien,** en inhibant la libération de CRH par l'hypothalamus et d'ACTH par l'hypophyse antérieure. Ainsi, le cortisol contribue au **retour à l'équilibre homéostatique**, perturbé par les modifications biologiques dues notamment à l'action de l'adrénaline.

Les différentes voies physiologiques mobilisées lors d'un stress aigu sont donc **coordonnées** au sein d'un **système complexe**, qui fait interagir le **système neveux**, le **système hormonal** et le **système immunitaire**. Ce réseau d'interrelations réciproques explique **l'adaptabilité de l'organisme** aux conditions changeantes du milieu.

L'organisme débordé dans ses capacités d'adaptation

Cette partie ne sera pas évaluée à l'épreuve écrite du baccalauréat.

Un **stress chronique** est la réponse de l'organisme à des événements dangereux ou déplaisants ayant lieu sur une **période prolongée**, et sur lesquels l'individu n'a pas de contrôle. Le stress chronique entraîne une **sécrétion prolongée de cortisol.** Or celle-ci provoque une diminution progressive du rétrocontrôle négatif du cortisol sur **l'axe hypothalamo-hypophyso-corticosurrénalien.** L'excès de cortisol conduit à des modifications structurelles du cerveau : diminution de la taille de l'hippocampe à l'origine de troubles de la mémoire, altérations neuronales du cortex préfrontal causant une diminution de l'attention, etc. Il s'agit d'une **plasticité mal-adaptative**, où les modifications affectant le cerveau ont des conséquences néfastes pour l'individu. Ainsi, en cas de stress chronique, le système complexe de réponse au stress est débordé, ce qui engendre des dommages sur la santé physique et mentale : anxiété, dépression, troubles cognitifs comme des difficultés de concentration, des troubles de la mémoire, problèmes de sommeil mais aussi douleurs somatiques (céphalées, douleurs abdominales, etc.). Des traitements **médicamenteux et non médicamenteux** peuvent être envisagés pour limiter les conséquences du stress chronique sur l'organisme.



Le stress biologique aigu.

DEUX ARTICLES DU *MONDE* À CONSULTER

- Comment le stress nous expose à l'accident cardiovasculaire p. 88 (Florence Rosier, *Le Monde* daté du 18.01.2017)
- Benzodiazépines : un plan contre l'overdose ? p. 89 (Florence Rosier, *Le Monde* daté du 21.09.2016)

ZOOM SUR…

LES THÉRAPIES CONTRE L'ANXIÉTÉ

Des médicaments peuvent être prescrits pour traiter certaines conséquences du stress, en particulier l'anxiété. Ces médicaments, les anxiolytiques (parfois appelés tranquillisants), réduisent l'anxiété mais aussi les manifestations associées, comme les troubles émotionnels et les problèmes de sommeil. Les anxiolytiques les plus utilisés sont les benzodiazépines. Elles agissent dans le cerveau sur les récepteurs au GABA, un neurotransmetteur inhibiteur présent dans de nombreuses structures cérébrales. En se fixant sur le récepteur au GABA, elles inhibent les neurones postsynaptiques. En particulier, elles inhibent l'activité de l'hypothalamus et du système limbique, lieu de l'intégration des émotions et de l'anxiété. En plus de leur effet anxiolytique, les benzodiazépines ont une action sédative, anticonvulsive et stimulent la relaxation musculaire. Mais leurs effets secondaires sont une somnolence et un ralentissement des réflexes. Leur utilisation à moyen et long terme entraîne une dépendance. Leur prescription est ainsi réservée aux cas d'urgence et doit être limitée dans le temps. D'autres pratiques non médicamenteuses (psychothérapie, relaxation, méditation, etc.) peuvent aussi limiter les effets du stress et favoriser la résilience (capacité à surmonter une situation difficile) de l'individu soumis à un stress chronique.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Le stress aigu, exercice 1

Le sujet

Le stress aigu est la réponse de l'organisme face à l'exposition à un agent stresseur. Les manifestations observables du stress aigu sont les suivantes :

- augmentation de l'activité cardiaque ;
- augmentation de l'activité respiratoire ;
- les poils se dressent sur la peau (« chair de poule ») ;
- augmentation du diamètre des pupilles.

À l'aide de vos connaissances, expliquez quels mécanismes permettent l'installation de ces modifications lors d'un stress aigu, puis comment est assuré le retour à l'équilibre de l'organisme à la fin du stress aigu.
Vous rédigerez un texte argumenté. On attend que l'exposé soit étayé par des expériences, des observations, des exemples, etc.

CE QU'IL NE FAUT PAS FAIRE

Oublier de traiter la seconde partie du sujet, c'est-à-dire le retour à l'équilibre à la fin du stress aigu.

Le corrigé

L'organisme humain doit maintenir constants les paramètres de son milieu intérieur, comme la température, le pH du sang, la glycémie, etc. Or, l'organisme vit dans un milieu dont les conditions peuvent fluctuer, l'obligeant à s'adapter à ces modifications. Les modifications physico-chimiques de l'environnement, mais aussi les agressions physiques ou encore les perturbations psychologiques peuvent constituer des agents stresseurs pour l'organisme. La présence d'un agent stresseur déclenche un ensemble de réactions de l'organisme, qui constitue le stress biologique aigu. Les principales manifestations observables d'un stress biologique sont stéréotypées : augmentation des activités cardiaque et respiratoire, effet « chair de poule », dilatation des pupilles. Quels mécanismes permettent l'installation de ces modifications ? Comment est assuré le retour à l'équilibre de l'organisme à la fin du stress aigu ? Pour répondre à cette problématique, nous décrirons la succession des mécanismes physiologiques mis en place lors d'un stress aigu ainsi que leurs conséquences sur la physiologie de l'organisme. Dans une seconde partie, nous montrerons que la fin du stress aigu s'accompagne d'un retour à l'équilibre de l'organisme.

I. Les mécanismes physiologiques du stress aigu

Les agents stresseurs sont de nature variée : modifications physico-chimiques de l'environnement (variation importante de la température, etc.), agressions physiques (rencontre avec un danger, comme un animal menaçant, etc.) ou encore perturbations psychologiques (réalisation d'une performance comme un examen, etc.). En fonction de son ressenti et de son vécu, l'individu analyse l'agent stresseur grâce à une coopération entre son cortex préfrontal et son système limbique (région du cerveau contenant l'hippocampe et l'amygdale, et impliquée dans les émotions, la mémoire et le comportement). En fonction des résultats de cette analyse, la présence de l'agent stresseur peut déclencher un stress aigu. Le stress aigu met en place des mécanismes physiologiques qui modifient alors le fonctionnement de l'organisme.

La perception de l'agent stresseur entraîne la stimulation du système limbique, qui stimule à son tour l'activité du système nerveux autonome. La conséquence de cette stimulation nerveuse est la sécrétion très rapide d'une hormone, l'adrénaline, par la glande médullosurrénale. La glande médullosurrénale est la partie centrale de la glande surrénale, localisée au-dessus de chaque rein. Les actions de l'adrénaline sur l'organisme sont multiples : augmentation de la fréquence cardiaque, augmentation de la fréquence respiratoire, mobilisation des réserves énergétiques par la libération accrue de glucose dans le sang à partir des réserves de glycogène hépatique, dilatation des pupilles et « chair de poule » (les poils se dressent sur la peau). L'ensemble

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

des modifications de l'organisme lui permet d'être rapidement prêt à réagir face à l'agent stresseur (fuir pour se soustraire au danger, par exemple). Ainsi, l'augmentation de l'activité cardio-respiratoire et la mobilisation des réserves énergétiques préparent l'organisme à un effort physique intense comme une course. La dilation des pupilles améliore la perception visuelle de l'environnement. D'autres comportements sont possibles face au danger : se cacher, lutter ou résister, et ils sont favorisés par les modifications physiologiques installées lors du stress aigu.

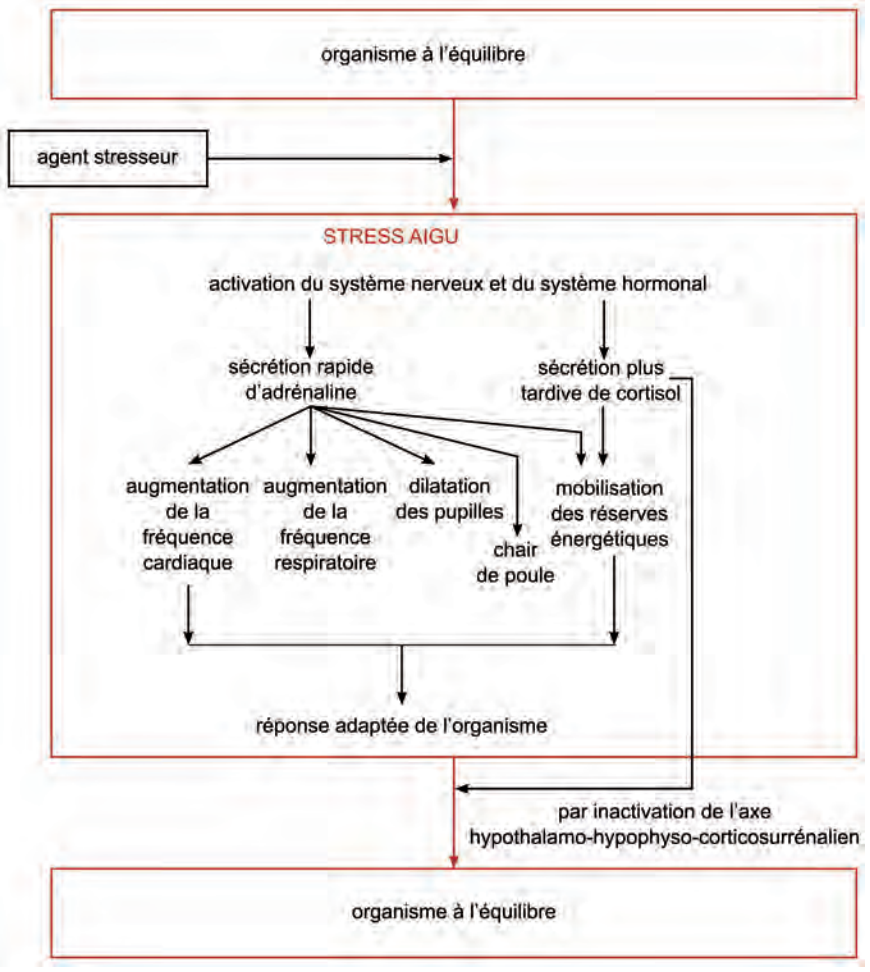
Dans un second temps, après la sécrétion de l'adrénaline, se met en place l'activation de l'axe hypothalamo-hypophyso-corticosurrénalien. En effet, lors du stress aigu, les neurones de l'hypothalamus, une structure nerveuse située à la base du cerveau, sont activés. L'activité des neurones hypothalamiques entraîne la sécrétion dans le sang d'une neurohormone, la CRH (*Corticotropine Releasing Hormone*). La CRH, après un très court trajet sanguin dans la tige hypophysaire, parvient à l'hypophyse antérieure, une glande endocrine située à proximité de l'hypothalamus. La CRH active alors la sécrétion par l'hypophyse antérieure d'une hormone, l'ACTH (*Adeno Cortico Tropic Hormone*). À son tour, l'ACTH déclenche la sécrétion d'une autre hormone, le cortisol, par les cellules de la glande corticosurrénale, située en périphérie de la glande médullosurrénale. L'arrivée de cortisol dans le sang active la production de glucose en stimulant sa libération à partir du glycogène hépatique. Ainsi, la sécrétion plus tardive de cortisol par rapport à celle de l'adrénaline vient renforcer ses effets en stimulant la mobilisation des réserves énergétiques et en contribuant à la réponse adaptée de l'organisme face à l'agent stresseur.

Ainsi, le stress aigu se caractérise par des mécanismes faisant intervenir le système nerveux et le système hormonal. La sécrétion rapide de l'adrénaline permet la mise en place de modifications physiologiques, qui rendent l'individu capable de produire une réponse adaptée face à l'agent stresseur. L'action de l'adrénaline est renforcée par l'action ultérieure du cortisol lors de l'activation de l'axe hypothalamo-hypophyso-corticosurrénalien. Le stress aigu constitue un ensemble important de modifications du fonctionnement de l'organisme, qui sont coûteuses d'un point de vue énergétique. Comment est permis le retour à l'équilibre de l'organisme, c'est-à-dire comment les modifications biologiques constitutives du stress aigu sont-elles arrêtées ?

II. À la fin du stress aigu : le retour à l'équilibre

Le cortisol, sécrété par la glande corticosurrénale, a d'autres actions en plus de favoriser la mobilisation des réserves énergétiques. L'une de ces actions est d'exercer un rétrocontrôle négatif sur l'axe hypothalamo-hypophyso-corticosurrénalien. En effet, le cortisol inhibe la sécrétion de la CRH par l'hypothalamus et celle de l'ACTH par l'hypophyse antérieure. Les conséquences de ces inhibitions sont une diminution progressive de la libération de cortisol par la glande corticosurrénale, et donc une diminution des effets du cortisol sur l'organisme. Ainsi, le rétrocontrôle négatif du cortisol sur l'axe hypothalamo-hypophyso-corticosurrénalien, associé à la diminution de la sécrétion d'adrénaline, permet le retour à l'équilibre de l'organisme, c'est-à-dire à la situation avant le stress aigu. Ce retour à la situation prévalant avant le stress est observable au niveau de l'organisme : ralentissement de l'activité cardio-respiratoire, diminution de la dilation des pupilles et fin de l'effet « chair de poule ».

Ainsi, le stress aigu constitue la réponse biologique de l'organisme face à la présence d'un agent stresseur. Les différentes voies physiologiques mobilisées à ce moment-là sont coordonnées et font intervenir le système nerveux et le système hormonal. La sécrétion rapide d'adrénaline, puis celle plus tardive de cortisol permettent à l'organisme de réagir de manière adaptée face à l'agent stresseur. Le rétrocontrôle négatif du cortisol sur l'axe hypothalamo-hypophyso-corticosurrénalien permet le retour à l'équilibre de l'organisme. Le stress aigu est donc une manifestation de l'adaptabilité de l'organisme aux conditions fluctuantes du milieu. Dans certains cas, il peut se prolonger et devenir chronique. Quels sont alors les mécanismes physiologiques du stress chronique ? Quelles sont ses conséquences sur l'organisme ?



Le stress aigu.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Comment le stress nous expose à l'accident cardiovasculaire

Cardiologie | Pour la première fois, une étude d'imagerie montre comment une situation de tension psychosociale, en activant une structure cérébrale, induit une inflammation dans nos artères qui accroît le risque d'infarctus du myocarde ou d'AVC

Comment « changer notre angoisse et notre fardeau en aurore artérielle » ? Pour le poète René Char (*Seuls demeurent*, 1945), la rencontre avec un inconnu avait cette vertu. Mais la réalité médicale est plus crue. Publiée le 11 janvier dans la revue *The Lancet*, une étude américaine révèle comment un stress que nous subissons, loin de se muer en *« aurore artérielle »*, obscurcit plutôt nos vaisseaux. Où l'on voit littéralement le stress activer notre amygdale, une aire primitive du cerveau impliquée dans la peur, puis déclencher une réaction inflammatoire qui dégénère en un dépôt de plaques de graisse (les « plaques d'athérome ») sur la paroi de nos vaisseaux. Cette cascade délétère, in fine, nous exposerait à un risque accru d'infarctus du myocarde ou d'accident vasculaire cérébral (AVC).

Est-ce vraiment un scoop ? Chez l'homme, *« les études épidémiologiques montrent depuis longtemps une association entre le stress et l'infarctus du myocarde »*, indique Alain Tedgui, qui dirige le Paris Centre de recherche cardiovasculaire (Inserm) à l'Hôpital européen Georges-Pompidou. Par exemple, le risque de faire un infarctus dans les vingt-quatre heures qui suivent le décès d'un proche est multiplié par 21.

Quant au risque d'infarctus lié à un stress chronique, *« il serait du même ordre de grandeur que le risque lié au tabac, à l'hypertension ou au diabète »*, relève le professeur Gabriel Steg, professeur d'épidémiologie à l'hôpital Bichat (Inserm, université Paris-Descartes). *« Ce risque est surtout documenté pour le stress au travail »*, renchérit Marcel Goldberg, professeur d'épidémiologie (Inserm, université Paris-Descartes).

Mais comment un tel stress peut-il aboutir à un accident cardiaque ? Chez l'homme, les indices restaient indirects. Chez l'animal, on sait bien qu'un stress, en agissant sur le cerveau, déclenche une série de réactions dont le but, face à un danger vital, est de faciliter la fuite ou le combat. Par exemple, il provoque une hypertonie musculaire et une hyper-sécrétion d'hormones (cortisol ou adrénaline) par les glandes surrénales. Mais, surtout, il a un autre effet, découvert récemment. Dans un modèle de souris sensible à l'athérosclérose, un stress chronique stimule, par son action sur le cerveau, des cellules souches de la moelle osseuse. Il s'ensuit une libération, dans la circulation sanguine, de globules blancs pro-inflammatoires. D'où une inflammation de la paroi des artères, dont *« on sait qu'elle favorise l'initiation et la progression des plaques d'athérome, et leurs complications »*, dit Gabriel Steg.

« Cette nouvelle étude dresse un parallèle chez l'homme de ces découvertes chez la souris », résume Alain Tedgui. Grâce à l'imagerie fonctionnelle, elle *« objective le lien »* entre le stress et ce risque, estime Gabriel Steg, qui salue un travail *« extrêmement élégant, malgré un nombre de patients plutôt faible »*.

Ce travail a réuni des équipes de l'Ecole de médecine de Harvard, à Boston, et de l'Ecole de médecine du Mont Sinaï, à New York. Les auteurs ont analysé, de façon rétrospective, les données de 293 patients, âgés de 55 ans en moyenne. Parmi eux, 256 étaient suivis pour un antécédent de cancer. Ce suivi incluait une technique d'imagerie sophistiquée, le PET-CT, sur le corps entier. Elle combine une analyse de l'activité biologique des tissus, la tomographie par émission de positons (PET), à un examen de la morphologie des organes, la tomodensitométrie reconstituée par ordinateur. La première technique fait appel à un dérivé du glucose marqué au fluor radioactif, le FDG : *« Plus les cellules sont actives, plus elles incorporent le FDG »*, explique Alain Tedgui.

Au moment de cet examen, entre 2005 et 2008, aucun patient n'avait de cancer actif depuis un an ni de maladie cardiovasculaire avérée. Ces patients ont été suivis durant 3,7 ans en moyenne. Durant cette période, 22 ont subi un infarctus, un AVC ou un autre événement cardiovasculaire. En reprenant leurs données de PET-CT, les chercheurs ont trouvé une association importante entre le niveau d'activité de l'amygdale, celui de la moelle osseuse, l'inflammation de la paroi de l'aorte (ou de la carotide) et le risque d'accident cardiovasculaire. Cette association persistait, même une fois écartée l'influence des autres facteurs de risque : hypertension, tabac, diabète…

Au final, chez les patients montrant une activité élevée dans l'amygdale, le risque apparaît augmenté de 59 %. *« Cette étude identifie pour la première fois, chez l'homme, la région du cerveau* [l'amygdale] *dont l'activité est associée à un risque d'infarctus ou d'AVC »*, souligne Ahmed Takawol, premier auteur. Qui plus est, ces accidents survenaient plus tôt chez ceux qui avaient les plus hauts niveaux d'activité dans l'amygdale.

En parallèle, les auteurs ont mené une étude pilote chez treize patients ayant vécu un état de stress post-traumatique (ESPT). À l'aide d'un questionnaire, ils ont évalué la perception de leur état de stress. En parallèle, un examen de PET-CT était pratiqué. Résultat : plus le stress perçu était important, plus l'activité de l'amygdale était élevée et l'inflammation des artères, forte.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Le biais de la chimiothérapie

Cardiologue à l'Hôpital européen Georges-Pompidou, le professeur Xavier Jouven se dit *« enthousiaste »* et « étonné » par cette étude. Étonné, d'abord, par le faible effectif de patients : *« C'est un modèle statistique peu robuste. »* L'étude présente aussi de *« gros biais »* : 87 % des patients avaient un antécédent de cancer, 80 % avaient reçu une chimiothérapie. Or, ce traitement *« bouleverse l'activité de la moelle osseuse et de la paroi des artères »*.

Malgré ces limites, Xavier Jouven salue cette étude *« très jolie »*. Si elle a été publiée dans *The Lancet*, selon lui, c'est parce qu'elle *« sort des sentiers battus »* : elle établit des ponts entre la neurologie, la cardiologie et l'immunologie. Mais, *« il faudra confirmer ces résultats chez un plus grand nombre de patients qui n'ont pas souffert de cancers ni été traités par chimiothérapie »*.

Une étude prospective élargie, financée par les NIH (les instituts de la santé américains), sera bientôt lancée chez plus de 200 patients atteints d'ESPT, annonce Zahi Fayad, dernier coauteur de l'étude. *« Nous comparerons le risque cardiovasculaire chez ceux qui souffrent d'ESPT et chez ceux qui ont surmonté ce stress. »*

Quid des perspectives d'application médicale ? Pas question de proposer un dépistage du stress par PET-CT : cet examen expose les patients à un faible niveau de radioactivité – justifié, dans cette étude, par la surveillance d'un antécédent de cancer. Mais selon les auteurs, *« soulager le stress psychosocial pourrait améliorer l'athérosclérose, au-delà de ses bénéfices sur le bien-être »*.

Florence Rosier, *Le Monde* daté du 18.01.2017

POURQUOI CET ARTICLE ?

Les études épidémiologiques mettent depuis longtemps en évidence les liens entre stress et accidents cardiovasculaires, sans que les mécanismes précis reliant ces événements soient pour autant élucidés. **Cet article présente les résultats d'une étude américaine mettant en évidence chez plusieurs patients l'association entre le stress, les processus inflammatoires, et le développement des plaques d'athérome responsables des accidents vasculaires cérébraux ou d'infarctus du myocarde.** L'article détaille la méthodologie employée dans l'étude, qui permet d'établir des corrélations entre différents éléments : l'activité de l'amygdale appartenant au système limbique, l'activité de la moelle osseuse, l'intensité des processus inflammatoires et l'augmentation des risques d'AVC. L'étude propose une explication à partir de recherches effectuées chez la souris : le stress chronique serait responsable d'une activation de cellules souches de la moelle osseuse, qui libèrent des globules blancs stimulant l'inflammation. Si les mécanismes reliant stress et accidents cardiovasculaires restent à décrypter précisément chez l'homme, la réduction du stress semble être un outil thérapeutique efficace pour lutter contre les accidents cardiovasculaires, qui constituent la deuxième cause de mortalité en France.

Benzodiazépines : un plan contre l'overdose ?

Pour contrer le mésusage massif de somnifères et de tranquillisants, une vaste action coordonnée pourrait être enfin envisagée. Elle ciblerait à la fois les médecins prescripteurs et les patients consommateurs

Quoi de neuf sur le front de la lutte contre l'insomnie et les troubles anxieux ? Ou plutôt, sur le front de la lutte contre les dérives de cette lutte, en France ? Pointées depuis plus de trente-cinq ans, ces dérives ont conduit à une overdose chronique de psychotropes, ces fausses « pilules du bonheur » qui modifient notre psychisme. Cet abus concerne surtout les benzodiazépines et apparentés, des médicaments aux effets hypnotiques (somnifères tels le Stilnox), anxiolytiques (tranquillisants comme le Lexomil), myorelaxants ou antiépileptiques. D'où ce triste record : *« Nous consommons deux à quatre fois plus de benzodiazépines que la plupart des pays développés »*, relève le professeur Bernard Bégaud, pharmacologue.

Quoi de neuf, donc ? En premier lieu, ce fléau continue de sévir. Selon nos calculs, réalisés à partir des dernières données fournies par l'Assurance-maladie, 52 millions de boîtes de benzodiazépines ont été vendues en France au premier semestre 2016. Pour l'année 2015, le total était de 104,4 millions. Il est à comparer aux 110,9 millions de boîtes d'hypnotiques et anxiolytiques vendues en 2011 et aux 110,3 millions vendues en 2010. Soit un fléchissement minime, confirmant la *« tendance à la stabilisation, voire à une baisse de 1 % par an au cours des quatre dernières années. Il n'y a pas de changement notable »*, résume Bernard Bégaud.

Alternatives non médicamenteuses

Face à cet abus têtu, les médecins généralistes se mobilisent. C'est qu'ils sont en première ligne : ils forment 80 % des primo-prescripteurs de benzodiazépines. *« En cette période de rentrée, on ne voulait pas que ce problème retombe dans l'oubli »*, déclare le professeur Vincent Renard, président du Collège national des généralistes enseignants (CNGE). Le 14 septembre, le CNGE a donc publié ses recommandations. Il préconise de *« privilégier les alternatives non médicamenteuses »* contre l'anxiété ou l'insomnie.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Nombre d'entre elles *« sont validées »* : par exemple, la relaxation musculaire ou les thérapies cognitivo-comportementales (TCC) contre les troubles du sommeil. Mais *« leur faible disponibilité, la nécessité d'être formé ou leur coût sont des limites à leur prescription »*. Ce collège recommande aussi *« d'aider au sevrage »* de ces produits. Des stratégies combinées ont ici *« démontré un effet »* : une psychothérapie, un suivi coordonné, une consultation dédiée en médecine générale…

Si le mal persiste, ce n'est pas faute d'alertes réitérées. Dès 1990, le psychiatre Marcel Legrain s'alarmait de ces excès… après trente ans de mirage. Car dans les années 1960, les benzodiazépines ont d'abord semblé des produits miracles. *« Ces médicaments paraissent anodins, alors qu'ils ne le sont pas du tout, en particulier chez les personnes âgées*, relève Dominique Martin, directeur de l'Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé (ANSM). *Il faut changer notre culture vis-à-vis de ces produits. »*

De fait, les effets pervers de cet « opium du peuple » sont nombreux. Sur le long terme, les benzodiazépines provoquent une accoutumance et une dépendance. D'où les difficultés de sevrage. Elles entraînent une somnolence, responsable de 1 % des accidents de la route. Elles occasionnent des troubles cognitifs lentement régressifs à l'arrêt, après une courte consommation. Elles favorisent les chutes : *« 10 000 à 20 000 fractures par an seraient liées aux benzodiazépines »*, relève Bernard Bégaud. Elles entraînent parfois des troubles du comportement. Quant à leur risque tératogène, il est méconnu : *« A l'ANSM, nous surveillons les effets des benzodiazépines durant la grossesse. Il y a un léger sur-risque de fente palatine »*, indique Dominique Martin.

Quid du risque de démence lié à leur consommation prolongée ? En septembre, la revue *Prescrire* a publié son bilan de six études sur le sujet. Celles-ci *« ne permettent pas d'établir une relation causale »*, concluent les auteurs. Pour le professeur Bégaud, qui a coordonné deux des études citées, aucun risque de démence n'a été montré pour une utilisation courte de ces produits. Il faut donc *« tout mettre en œuvre pour restreindre les prescriptions des benzodiazépines aux seuls patients qui en ont besoin, avec des durées d'utilisation courtes »*.

Dès 1991, les autorités sanitaires ont limité la durée de la prescription des benzodiazépines à douze semaines pour les anxiolytiques, à quatre semaines pour les hypnotiques. Mais le mésusage persiste. « Environ 7 millions de personnes auraient consommé des benzodiazépines anxiolytiques en 2014, dont 16 % en traitement chronique (plusieurs années) », notait la Haute Autorité de santé (HAS) en juin 2015. La HAS et l'ANSM ont donc réitéré leurs recommandations à destination des professionnels de santé.

D'autres mesures ont été entreprises. Depuis le 1er janvier 2012, l'Assurance-maladie propose une rémunération pour récompenser les généralistes qui atteignent divers objectifs de santé publique. Résultat : le taux des patients de plus de 65 ans sous une benzodiazépine à demi-vie longue a baissé. De 13,7 % fin 2011, il est passé à 11,3 % fin 2013 et à 10 % fin 2015. Une dynamique modeste, mais encourageante.

La pression des patients

À l'évidence, ces mesures éparses ne suffisent pas. *« Dans une société marquée par l'incertitude et l'angoisse au quotidien, certains patients se tournent vers leur médecin pour trouver des palliatifs médicamenteux. Ce n'est pas toujours facile de résister à cette pression »*, confiait au Monde le professeur Pierre-Louis Druais, président du Collège de la médecine générale, en 2014.

Cette pression, les autorités sanitaires en ont conscience. *« De nombreux patients sont très attachés à leur benzodiazépine, ce qui en complique l'arrêt. Nous ne pourrons réduire les prescriptions sans une communication importante auprès des usagers. Il faut à la fois viser les médecins et le grand public »*, estime Dominique Martin.

Selon Bernard Bégaud, l'information des médecins pèche encore. *« Par exemple, de nombreux médecins ignorent qu'après quelques jours, les benzodiazépines altèrent les rythmes du sommeil. Leur utilisation prolongée crée des insomniaques ! »* Pour Vincent Renard, ce problème demande notamment *« une meilleure organisation des soins, avec la possibilité de recourir à des tiers : par exemple des consultations de soutien coordonnées avec des infirmières »*. Généralistes et psychiatres plaident aussi pour un remboursement des prises en charge alternatives, comme les TCC.

Depuis quelques mois, l'ANSM a entrepris de consulter médecins et associations de patients. Et les autorités sanitaires discutent d'une action globale concertée. Les pouvoirs publics seraient-ils enfin conscients de l'ampleur des mesures à mettre en œuvre pour espérer enrayer cette dépendance massive ? Avec un motif d'espoir : *« Grâce à leur formation, les jeunes généralistes prescrivent moins de benzodiazépines que leurs aînés »*, se réjouit Vincent Renard. ●

Florence Rosier, *Le Monde* daté du 21.09.2016

POURQUOI CET ARTICLE ?

La France est malheureusement célèbre pour sa consommation beaucoup trop élevée de médicaments psychotropes, comme les anxiolytiques ou les somnifères. Prescrits majoritairement par les médecins généralistes, ces psychotropes, s'ils peuvent avoir une utilité pour certains patients dans des indications précises, présentent de très nombreux défauts. Ils entraînent accoutumance et dépendance, sont responsables de somnolence qui génère des accidents lors de la conduite de véhicules ou des chutes chez les personnes âgées, sans oublier les troubles cognitifs et comportementaux qu'ils occasionnent. **Cet article montre que, depuis plusieurs années, les autorités sanitaires ont la volonté de faire évoluer la prescription de psychotropes en les limitant à des prescriptions de très faibles durées et uniquement pour des patients qui en ont réellement besoin, afin de réduire leur usage dans la population générale.** Cet objectif nécessite de favoriser les alternatives non médicamenteuses. Validées scientifiquement, ces alternatives sont nombreuses, mais parfois encore trop difficiles d'accès ou trop coûteuses. Il faut également aider le sevrage des patients dépendants de ces médicaments. Cet enjeu de santé publique nécessite à la fois d'agir au niveau des médecins prescripteurs, mais aussi d'informer et d'accompagner au mieux les patients concernés.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

LE GUIDE PRATIQUE

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Méthodologie et conseils

Présentation de l'épreuve

L'épreuve comporte deux parties : une épreuve écrite et une épreuve pratique d'évaluation des compétences expérimentales (ECE). Attention, l'épreuve porte sur les compétences acquises lors de l'enseignement de spécialité SVT de première et de terminale et sur les thèmes du programme de terminale à l'exception des quatre parties suivantes :

- D'autres mécanismes contribuent à la diversité du vivant (la Terre, la vie et l'organisation du vivant)
- La domestication des plantes (enjeux planétaires contemporains)
- Comprendre les conséquences du réchauffement climatique et les possibilités d'actions (enjeux planétaires contemporains)
- L'organisme débordé dans ses capacités d'adaptation (corps humain et santé)

Première partie : épreuve écrite

Exercice 1

Il est noté sur 6 ou 7 points. L'énoncé pose **une question scientifique**, qui peut être accompagnée **d'un ou plusieurs documents**. L'objectif est d'évaluer votre capacité à répondre à la question posée en rédigeant un texte argumenté exposant ses connaissances de manière structurée. Selon les consignes du sujet ou de votre propre initiative, vous pouvez intégrer dans son texte d'autres modes de communication scientifique : schémas, tableaux, graphiques, etc. La réponse est à argumenter avec des expériences, des observations, des exemples issus des connaissances ou des documents du sujet. La réussite de cet exercice nécessite de respecter les consignes de l'énoncé (par exemple, un schéma de synthèse est-il exigé ?). Différents moments doivent structurer votre travail :

- identifier la question scientifique posée pour **délimiter précisément le sujet** ;
- rechercher les connaissances vous permettant de répondre à la question ;
- construire **au brouillon** le plan détaillé du développement, en veillant à sa structuration et en y intégrant les différents arguments et les éléments de communication nécessaires (schémas, graphiques, etc.) ;
- confronter régulièrement la question posée au plan pour vérifier que le sujet est traité complètement et **sans hors-sujet.** Les documents proposés n'ont pas à être analysés pour eux-mêmes mais ils peuvent être utilisés dans votre réponse ;
- rédiger directement la réponse sur la copie, ce que permet uniquement un plan suffisamment détaillé.

Exercice 2

L'exercice 2 est noté sur 8 points (si l'exercice 1 est sur 7 points) ou 9 points (si l'exercice 1 est sur 6 points). L'objectif de cet exercice est d'évaluer votre capacité à mettre en œuvre une démarche scientifique pour résoudre un problème posé.

Après identification du problème scientifique, vous devez choisir et construire votre démarche de résolution du problème en analysant les documents fournis, en les mettant en relation entre eux et en les associant avec les connaissances nécessaires. Celles-ci peuvent vous guider dans votre démarche, mais elles sont surtout utiles pour exploiter les documents. Plusieurs étapes sont nécessaires :

- identifier avec précision le problème posé et les exigences du sujet ;
- prendre connaissance des documents en identifiant les informations utiles pour résoudre le problème ;
- construire un plan détaillé au brouillon, qui indique la mise en relation des informations issues des documents aux connaissances. L'ordre d'étude des documents est déterminé par la logique du raisonnement et n'est donc pas forcément celui de l'énoncé ;
- rédiger directement la réponse sur la copie, sans oublier de faire référence aux documents dès qu'une information en est extraite.

Seconde partie : épreuve pratique d'évaluation des compétences expérimentales (ECE)

L'objectif est d'évaluer vos compétences expérimentales, c'est-à-dire vos capacités à choisir une stratégie pour résoudre un problème scientifique, à la mettre en œuvre pour obtenir des résultats exploitables, à analyser ces résultats pour aboutir à une réponse au problème posé. Vous êtes amené(e) à utiliser des instruments d'observation (un microscope, par exemple), du matériel d'expérimentation ou des supports numériques, sur lesquels vous vous êtes entraîné(e) pendant l'année.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Préparer l'épreuve de SVT

Au cours des apprentissages, il faut vérifier que les **principales notions** de chaque chapitre sont bien comprises et acquises et que les **compétences** (analyse de documents, élaboration des raisonnements, activités pratiques, etc.) sont maîtrisées. Organisez soigneusement les différents travaux effectués pour chaque chapitre pour vous y retrouver rapidement lors des révisions. Il ne faut pas oublier de préparer l'épreuve pratique (ou évaluation des compétences expérimentales). Lors des séances de travaux pratiques, identifiez bien les activités faites (observations, expérimentations, supports numériques).

Il est conseillé de faire au fur et à mesure des **fiches de synthèse**. Ces fiches doivent contenir le plan, les connaissances essentielles, les schémas à retenir et quelques exemples, bien choisis, que vous pourrez utiliser pour étayer vos argumentations. Ces fiches présentent l'intérêt d'être facilement réutilisables lors des révisions. Pour chaque chapitre, identifiez les capacités spécifiques à travailler.

Entraînez-vous régulièrement lors des activités d'apprentissages en cours, en faisant des exercices et lors des évaluations. Vous pouvez ajouter une **partie méthodologie** à chaque fiche de synthèse correspondant aux capacités travaillées ou réaliser des fiches de méthode.

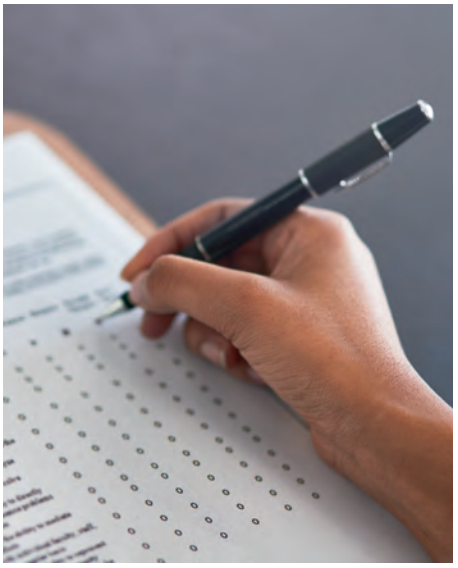
Apprenez à vous servir des **fiches techniques** au cours des travaux pratiques dont vous disposerez lors de l'épreuve pratique. N'hésitez pas à noter les petites astuces qui facilitent la réalisation de ces activités. Enfin certains supports numériques sont en accès libre et il est possible de vous entraîner de chez vous.

Il est important de bien connaître le plan de chaque chapitre mais aussi d'avoir une vue d'ensemble sur chaque thème qui regroupe plusieurs chapitres. Pour cela, vous pouvez vous aider de **cartes mentales** faites par chapitre ou par grand thème.

Profitez de chaque période de vacances pour réviser les parties travaillées, en insistant particulièrement sur les sujets qui posent le plus de difficultés. Pour mémoriser efficacement des notions sur le long terme, il faut associer réactivation régulière des connaissances et tests systématiques de ces connaissances, par exemple en faisant des QCM pour vérifier leur acquisition. Il faut éviter impérativement de faire des impasses. La révision consiste à reprendre les notions, tester ses acquis, refaire des activités, des exercices ou des évaluations.

Dès le mois de janvier, il est nécessaire de faire un planning semaine par semaine pour réviser progressivement les différentes parties du programme. Il est souvent bénéfique de retravailler les évaluations faites en classe pour identifier les exigences attendues de chaque exercice, repérer les erreurs et ainsi éviter de les commettre à nouveau. Faites régulièrement des exercices de l'épreuve écrite, en préparant des plans détaillés. Comparez alors votre réponse avec le corrigé et retenez ce que vous avez su faire et ce que vous avez encore à améliorer.

Deux semaines avant l'épreuve, continuez à réactiver les connaissances et les capacités à maîtriser pour les épreuves, sans oublier de revoir les activités pratiques sur lesquelles vous pourriez être interrogé(e) lors des ECE. Soyez réaliste en conservant des moments de repos et de détente afin de vous concentrer avec efficacité. Il est essentiel d'arriver reposé(e) et serein(e) aux épreuves terminales. Le travail régulier que vous avez fait tout au long de l'année, votre motivation et votre confiance en vous sont les meilleurs atouts pour réussir.



ZOOM SUR…

L'ÉPREUVE EN BREF

- Mois de mars
- Épreuve écrite : 3 h 30 min
- Épreuve pratique (ECE) : 1 h
- Épreuve écrite : 15 points
- Épreuve pratique (ECE) : 5 points
- Coefficient 16

L'ORAL DE RATTRAPAGE (ÉPREUVE ORALE DE CONTRÔLE)

En cas d'oral de rattrapage, le candidat peut passer une épreuve orale de contrôle en spécialité SVT. La préparation de l'épreuve est de vingt minutes et la présentation orale dure également vingt minutes. Le candidat tire au sort un sujet avec deux questions, portant sur deux thématiques différentes du programme. Il traite les deux questions, dont une au moins comporte des documents proches de ceux étudiés durant l'année en cours. L'évaluateur peut poser des questions sur du matériel expérimental qu'il propose au candidat et lui demander d'effectuer une manipulation simple. L'objectif de cette épreuve est d'apprécier les acquis du candidat en évaluant autant les connaissances que la maîtrise des compétences scientifiques.

CONSEILS POUR RÉUSSIR L'ÉPREUVE ÉCRITE

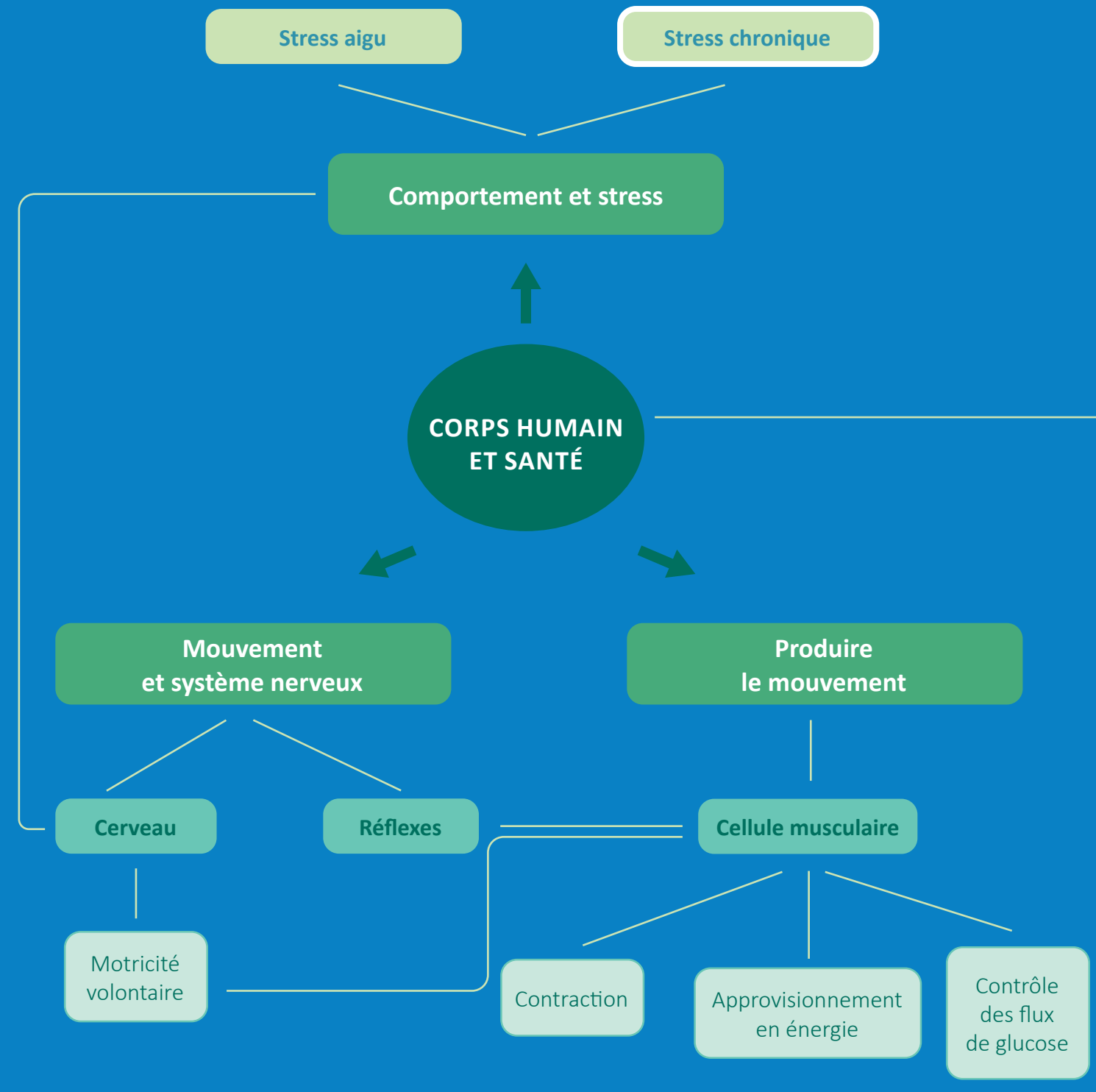
De manière générale, la réponse aux exercices 1 et 2 contient une introduction (qui définit les termes du sujet, présente la question et annonce le plan), un développement puis une conclusion (qui contient le bilan puis une ouverture vers un sujet voisin). Le développement est structuré en plusieurs paragraphes dont chacun développe un aspect de la réponse. Des titres numérotés et mis en valeur peuvent annoncer les paragraphes. Les autres éléments (schémas, graphiques, etc.) doivent respecter les règles de communication habituelles. Ainsi, les schémas doivent être organisés, grands, en couleurs, légendés et accompagnés d'un titre. Penser à relire la copie avant la fin de l'épreuve pour corriger la rédaction et l'orthographe.

LA SPÉCIALITÉ SVT AU GRAND ORAL

Après les épreuves finales de spécialité, il restera à finir le programme d'enseignement de SVT en travaillant les parties qui n'ont pas été évaluées lors de l'épreuve finale. Il faudra finir la préparation des questions que vous présenterez au grand oral et vous entraîner, avec l'aide de vos professeurs, à répondre aux questions du jury du grand oral sur les questions préparées, l'ensemble du programme de spécialité de terminale et votre projet d'orientation. Le travail effectué pour l'épreuve finale sera donc réinvesti pour préparer le grand oral. Cette épreuve nécessite aussi de préparer la présentation orale, c'est-à-dire de progresser dans votre capacité à vous s'exprimer devant le jury, à tenir un discours clair, à vous engager dans votre parole et à convaincre votre auditoire.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Sciences de la vie et de la Terre : la synthèse du programme

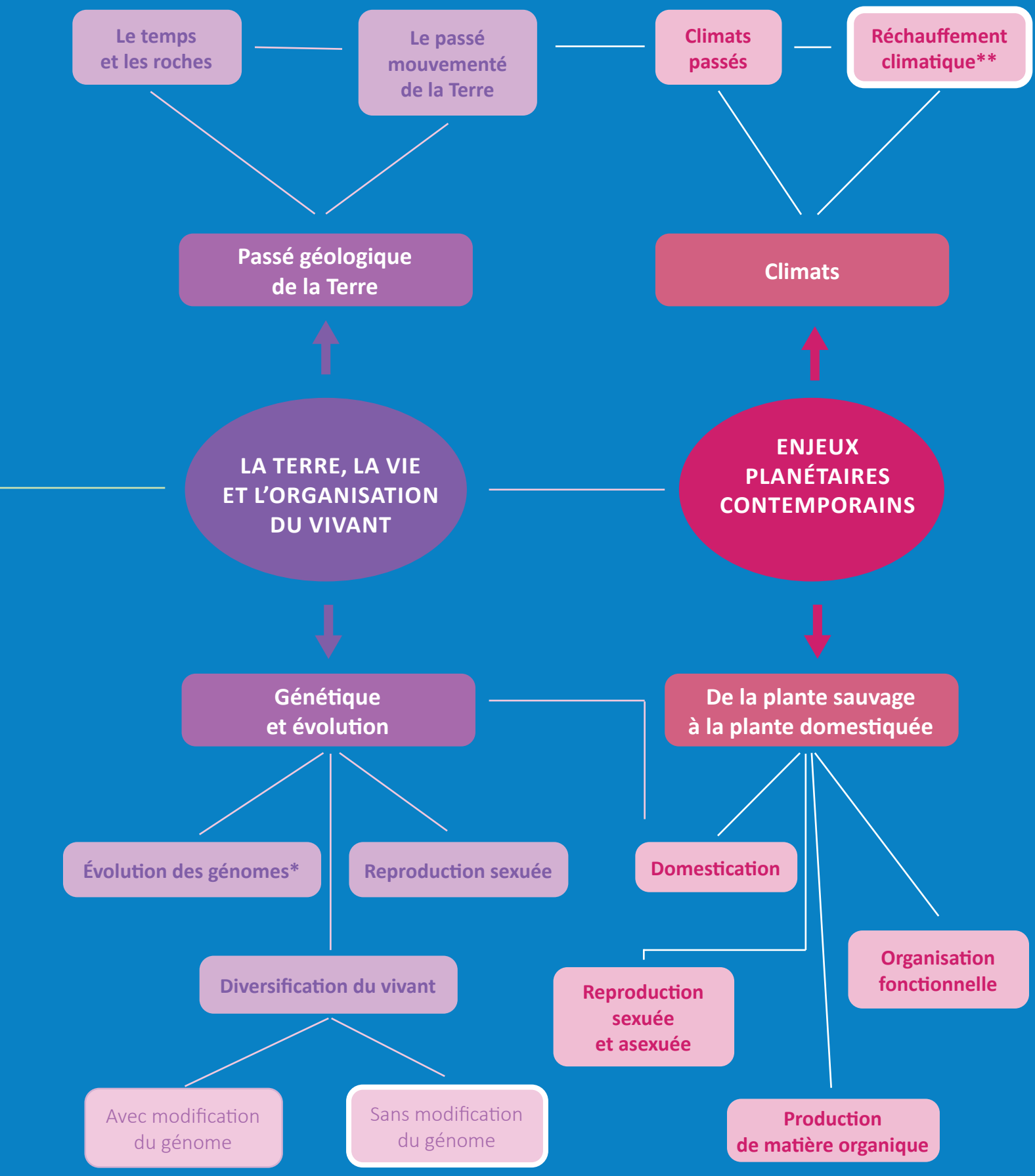


Thèmes non évalués à l'épreuve de terminale

* Lien avec l'enseignement scientifique : une histoire du vivant

**Lien avec l'enseignement scientifique : sciences, climats et société

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.



© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Crédits

Couverture

Grimpeur sur le Belay à Watzmann – Alpes © Crédits : DieterMeyrl

De la plante sauvage à la plante domestiquée

p. 28 Plant de tomates © vkbhat/iStock ; p. 29 Lentilles © lesichkadesign/iStock ; p. 31 Raisins © chang/iStock ;
p. 33 Papillon pollinisateur par fir0002flagstaffotos@gmail.com
Canon 20D + Sigma 150mm f/2.8 + Canon MT 24-EX, Travail personnel, GFDL 1.2/WikiCommons ;
p. 35 Semences par Arn, Travail personnel, CC BY-SA 4.0/WikiCommons

Les climats de la Terre : comprendre le passé pour agir aujourd'hui et demain

p. 45 Cheminée © Ivan Murauyou/iStock ; Iceberg © Bkamprath/iStock

Comportements, mouvement et système nerveux

p. 53 Joueuse de tennis © microgen/iStock

Produire le mouvement : contraction musculaire et apport d'énergie

p. 68 Réhydratation © zoranm/iStock ; p. 84 Stress © gradyreese/iStock ; Tension © BrianAJackson/iStock ;
Femme effrayée © George Marks/iStock

Guide pratique

Planning © Kwangmoozaa/iStock ; Lycéenne © GaudiLab/iStock ;
Lycéen regardant au microscope © noppharat05081977/iStock ;
Révisions © PeopleImages/iStock

EAN : 9782820811271
© rue des écoles – *Le Monde*, 2020
Éditions rue des écoles – 2 ter rue des Chantiers – 75005 Paris
Achevé d'imprimer en France par Aubin, en décembre 2020
Dépôt légal : janvier 2021

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

MAIF

assureur militant

MAIF - société d'assurance mutuelle à cotisations variables - CS 90000 - 79038 Niort cedex 9. Entreprise régie par le Code des assurances.

Réviser son bac avec Le Monde

CAHIER SPÉCIAL

16 pages pour se tester avant le bac

Testez-vous pour le bac

SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE

62 questions

corrigées et commentées

rue des écoles

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Génétique et évolution

L'origine du génotype des individus

→ Le cours p. 6

Question 1

La méiose se caractérise par :

☐ **A.** la formation à partir d'une cellule initiale de quatre cellules en une seule division.
☐ **B.** l'obtention de cellules haploïdes.
☐ **C.** l'obtention de cellules filles possédant la moitié de l'information génétique de la cellule initiale.
☐ **D.** deux réplications de l'ADN.

Question 2

Lors de la méiose, le brassage interchromosomique a lieu au cours de :

☐ **A.** la prophase de première division.
☐ **B.** la métaphase de première division.
☐ **C.** l'anaphase de première division.
☐ **D.** la prophase de seconde division.

Question 3

Un crossing-over :

☐ **A.** permet un brassage interchromosomique.
☐ **B.** a lieu entre deux chromatides d'un même chromosome.
☐ **C.** a lieu entre deux chromatides appartenant chacune à l'un des deux chromosomes homologues.
☐ **D.** permet un brassage intrachromosomique.

Question 4

Un crossing-over inégal :

☐ **A.** aboutit à un échange déséquilibré d'information génétique entre deux chromosomes non homologues.
☐ **B.** aboutit à un échange déséquilibré d'information génétique entre deux chromosomes homologues.
☐ **C.** peut contribuer à enrichir le génome.
☐ **D.** constitue une anomalie de la méiose.

Évolution des génomes et diversité du vivant

→ Le cours p. 8

Question 5

Les transferts horizontaux de gènes chez les bactéries :

☐ **A.** sont rares.
☐ **B.** peuvent s'effectuer par échanges entre bactéries selon des modalités variées.
☐ **C.** contribuent peu à l'évolution de la diversité génétique des bactéries.
☐ **D.** participent à l'augmentation des phénomènes de résistance aux antibiotiques en santé humaine.

Question 6

Dans une population respectant les conditions de l'équilibre du modèle de Hardy-Weinberg, on considère à la génération *n* un gène présentant un allèle A (de fréquence p) et un allèle B (de fréquence q). On peut affirmer que :

☐ **A.** les fréquences alléliques de A et de B sont stables d'une génération à une autre.
☐ **B.** les fréquences génotypiques sont stables d'une génération à une autre.
☐ **C.** la fréquence des individus hétérozygotes est p x q à chaque génération.
☐ **D.** la fréquence des individus homozygotes (A//A) est p^2.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Question 7

La symbiose :

☐ **A.** est une association à bénéfice unilatéral.
☐ **B.** permet aux deux partenaires d'acquérir de nouveaux caractères.
☐ **C.** est une association de deux individus d'une même espèce.
☐ **D.** est une association de deux individus d'espèces différentes.

Question 8

La diversification des êtres vivants :

☐ **A.** peut se faire par apprentissage.
☐ **B.** peut se faire par transfert horizontal de gènes.
☐ **C.** peut se faire par symbiose.
☐ **D.** nécessite toujours une modification du génome.

À la recherche du passé géologique de notre planète

Le temps et les roches

→ Le cours p. 20

Question 9

La datation relative :

☐ **A.** se fonde sur quelques grands principes.
☐ **B.** permet de donner un âge précis à un événement.
☐ **C.** permet de donner une durée précise à un événement.
☐ **D.** permet d'ordonner dans le temps plusieurs événements.

Question 10

Le principe de superposition :

☐ **A.** n'est valable que pour les couches sédimentaires.
☐ **B.** s'applique même quand les couches sédimentaires sont renversées.
☐ **C.** indique que de deux couches superposées, la plus ancienne est la plus haute.
☐ **D.** indique que de deux couches superposées, la plus ancienne est la plus basse.

Question 11

Les caractéristiques d'un bon fossile stratigraphique sont :

☐ **A.** une grande abondance.
☐ **B.** une répartition géographique peu étendue.
☐ **C.** une durée de vie de l'espèce réduite.

Question 12

Le radiochronomètre utilisable pour dater une roche dont l'âge est estimé en première approximation à environ 80 millions d'années est :

☐ **A.** $^{87}Rb \rightarrow {}^{87}Sr$.
☐ **B.** $^{40}K \rightarrow {}^{40}Ar$.
☐ **C.** $^{238}U \rightarrow {}^{206}Pb$.
☐ **D.** $^{235}U \rightarrow {}^{207}Pb$.

Les traces du passé mouvementé de la Terre

→ Le cours p. 22

Question 13

Un cycle orogénique se caractérise par 3 grandes phases, qui se succèdent temporellement dans l'ordre suivant :

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

☐ **A.** sédimentation → orogénèse → disparition de la chaîne de montagnes.
☐ **B.** disparition de la chaîne de montagnes → orogénèse → sédimentation.
☐ **C.** sédimentation → disparition de la chaîne de montagnes → orogénèse.

Question 14

Le dernier cycle orogénique le plus récent en Europe est le cycle orogénique :

☐ **A.** hercynien.
☐ **B.** cadomien.
☐ **C.** alpin.
☐ **D.** calédonien.

Question 15

Les ophiolites :

☐ **A.** sont des lambeaux de lithosphère océanique en domaine continental.
☐ **B.** sont des lambeaux de lithosphère continentale en domaine océanique.
☐ **C.** résultent d'une obduction.
☐ **D.** affleurent dans les chaînes de collision.

Question 16

Une marge massive :

☐ **A.** est une zone de transition entre une lithosphère océanique et une lithosphère continentale.
☐ **B.** présente une forte activité sismique.
☐ **C.** présente des blocs basculés séparés par des failles inverses.
☐ **D.** présente des blocs basculés séparés par des failles normales.

De la plante sauvage à la plante domestiquée

L'organisation fonctionnelle des plantes à fleurs

→ Le cours p. 28

Question 17

Les stomates :

☐ **A.** permettent l'absorption de la solution du sol.
☐ **B.** permettent l'entrée de CO_2 dans la plante en présence de lumière.
☐ **C.** sont généralement situés sur la face supérieure des feuilles.
☐ **D.** sont indispensables pour la réalisation de la photosynthèse.

Question 18

La sève brute :

☐ **A.** circule dans les vaisseaux du phloème.
☐ **B.** circule dans les vaisseaux du xylème.
☐ **C.** permet d'apporter la matière prélevée dans le sol jusqu'aux feuilles.
☐ **D.** contient de l'eau et de la matière organique.

Question 19

Un méristème se caractérise par :

☐ **A.** une forte activité mitotique.
☐ **B.** une forte activité méiotique.
☐ **C.** la présence de cellules indifférenciées.
☐ **D.** la présence de cellules différenciées.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Question 20
Un bourgeon :

☐ **A.** assure la croissance des tiges.
☐ **B.** permet la formation des feuilles.
☐ **C.** abrite le méristème racinaire.
☐ **D.** disparaît pendant l'hiver chez les arbres vivant en climat tempéré.

La plante, productrice de matière organique

→ Le cours p. 30

Question 21
L'organite spécialisé dans la photosynthèse est :

☐ **A.** la mitochondrie.
☐ **B.** la vacuole.
☐ **C.** le chloroplaste.
☐ **D.** le lysosome.

Question 22
La chaîne photosynthétique :

☐ **A.** se situe dans la membrane des thylakoïdes du chloroplaste.
☐ **B.** se situe dans le stroma du chloroplaste.
☐ **C.** intervient lors de la phase chimique de la photosynthèse.
☐ **D.** intervient lors de la phase photochimique de la photosynthèse.

Question 23
La phase photochimique de la photosynthèse est caractérisée par :

☐ **A.** la fixation du CO_2 atmosphérique.
☐ **B.** l'oxydation de l'H_2O.
☐ **C.** la production de R.
☐ **D.** la production d'ATP.

Question 24
La phase chimique de la photosynthèse est caractérisée par :

☐ **A.** la synthèse de trioses-phosphates.
☐ **B.** l'utilisation des produits de la phase photochimique.
☐ **C.** la production de RH_2.
☐ **D.** la consommation d'ADP.

Reproduction de la plante entre vie fixée et mobilité

→ Le cours p. 32

Question 25
La reproduction asexuée :

☐ **A.** repose sur la totipotence des cellules végétales.
☐ **B.** n'a lieu que provoquée par l'Homme.
☐ **C.** peut s'effectuer par bouturage.
☐ **D.** n'est pas utilisée à l'échelle industrielle pour produire des plantes.

Question 26
Les grains de pollen :

☐ **A.** sont produits par les étamines.
☐ **B.** contiennent l'embryon de la future graine.
☐ **C.** sont les vecteurs contenant les gamètes mâles.
☐ **D.** sont toujours transportés par les insectes.

Question 27
Des collaborations entre les plantes et les animaux s'exercent :

☐ **A.** exclusivement lors de la pollinisation.
☐ **B.** lors de la formation des fleurs.
☐ **C.** lors de la pollinisation et la dissémination des graines.
☐ **D.** exclusivement lors de la dissémination des gamètes.

Question 28
Une interaction mutualiste :

☐ **A.** a lieu entre deux individus de deux espèces différentes.
☐ **B.** a lieu entre deux individus de la même espèce.
☐ **C.** n'est bénéfique qu'à l'un des deux partenaires.
☐ **D.** est bénéfique à chacun des deux partenaires.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

La domestication des plantes

→ Le cours p. 34

Question 29

La sélection exercée par l'Homme sur les plantes cultivées :

☐ **A.** a commencé avec la mise au point de méthodes biotechnologiques.
☐ **B.** est qualifiée d'artificielle.
☐ **C.** ne s'effectue que par hybridation végétale.
☐ **D.** fut réalisée initialement à partir d'espèces sauvages.

Question 30

La technique d'hybridation :

☐ **A.** permet d'obtenir des variétés nouvelles cumulant les caractéristiques des parents.
☐ **B.** consiste toujours à croiser deux individus d'espèces différentes.
☐ **C.** est la seule technique permettant de modifier le génome d'une plante.

Question 31

Les OGM peuvent être obtenus par :

☐ **A.** des techniques d'édition du génome.
☐ **B.** un croisement de deux individus d'espèces différentes.
☐ **C.** transgénèse.
☐ **D.** des croisements multiples entre des individus d'une même espèce.

Question 32

Les semences :

☐ **A.** sont toutes produites par des sociétés spécialisées.
☐ **B.** sont toutes certifiées.
☐ **C.** influencent peu par leur qualité le résultat des cultures.
☐ **D.** peuvent être obtenues par biotechnologie.

Les climats de la Terre : comprendre le passé pour agir aujourd'hui et demain

Les variations climatiques passées et actuelles

→ Le cours p. 46

Question 33

Les études du climat passé montrent que depuis – 800 000 ans :

☐ **A.** la température n'a pas varié.
☐ **B.** la température a présenté des variations cycliques, avec alternance de glaciations et de périodes interglaciaires.
☐ **C.** la température a régulièrement augmenté.
☐ **D.** la température a régulièrement diminué.

Question 34

Parmi les facteurs suivants dont les variations influencent le climat, les facteurs astronomiques sont :

☐ **A.** l'albédo terrestre moyen.
☐ **B.** l'inclinaison de l'axe de rotation terrestre.
☐ **C.** l'effet de serre terrestre.
☐ **D.** la forme de l'orbite terrestre.

Question 35

Le climat chaud du Crétacé est lié à :

☐ **A.** une forte activité magmatique libérant du CO_2 dans l'atmosphère.
☐ **B.** une forte activité magmatique consommant du CO_2 de l'atmosphère.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

☐ **C.** un fort albédo dû à une absence de calottes polaires.
☐ **D.** un faible albédo moyen terrestre dû à une absence de calottes polaires.

Question 36

Le climat froid du Permien-Carbonifère est la conséquence :

☐ **A.** d'une formation importante de roches carbonées consommant du CO_2 atmosphérique.
☐ **B.** d'une formation importante de roches carbonées libérant du CO_2 dans l'atmosphère.
☐ **C.** d'une forte altération des chaînes de montagnes consommant du CO_2 atmosphérique.
☐ **D.** d'une forte altération des chaînes de montagnes libérant du CO_2 dans l'atmosphère.

Comportements, mouvement et système nerveux

Les réflexes

→ Le cours p. 54

Question 37

Un réflexe myotatique :

☐ **A.** est à l'origine d'un mouvement volontaire.
☐ **B.** a son centre nerveux situé dans le cerveau.
☐ **C.** a son centre nerveux situé dans la moelle épinière.
☐ **D.** déclenche un mouvement dont l'intensité est toujours identique.

Question 38

Les neurones sensoriels :

☐ **A.** passent par la racine ventrale des nerfs rachidiens.
☐ **B.** ont leur corps cellulaire dans le ganglion rachidien.
☐ **C.** propagent les messages de la moelle épinière au muscle.
☐ **D.** propagent les messages du muscle à la moelle épinière.

Question 39

Les neurones moteurs ou motoneurones :

☐ **A.** cheminent par la racine ventrale des nerfs rachidiens.
☐ **B.** cheminent par la racine dorsale des nerfs rachidiens.
☐ **C.** propagent les messages de la moelle épinière au muscle.
☐ **D.** propagent les messages du muscle à la moelle épinière.

Question 40

Le message nerveux dans un neurone :

☐ **A.** est de nature électrique.
☐ **B.** est de nature chimique.
☐ **C.** a une amplitude variable.
☐ **D.** présente une intensité codée en fréquence de potentiels d'action.

Cerveau et motricité volontaire

→ Le cours p. 56

Question 41

Dans le cerveau, les cellules gliales participent à :

☐ **A.** la génération et la transmission du message nerveux.
☐ **B.** la nutrition des neurones.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

☐ **C.** l'élimination des déchets issus des neurones.
☐ **D.** la protection des neurones contre les pathogènes.

Question 42

Un accident vasculaire cérébral dans le cortex moteur droit entraîne une paralysie :

☐ **A.** de la partie droite du corps.
☐ **B.** des deux membres supérieurs.
☐ **C.** des deux membres inférieurs.
☐ **D.** de la partie gauche du corps.

Question 43

Une lésion de la moelle épinière entraîne une paralysie :

☐ **A.** d'un seul côté du corps.
☐ **B.** de tout le corps.
☐ **C.** de la partie du corps située au-dessus de la lésion.
☐ **D.** de la partie du corps située en dessous de la lésion.

Question 44

La plasticité cérébrale :

☐ **A.** est due à une augmentation du nombre de neurones.
☐ **B.** est due à un remaniement des réseaux neuronaux.
☐ **C.** est intense chez les jeunes enfants.
☐ **D.** ne dépend pas de l'environnement.

Produire le mouvement : contraction musculaire et apport d'énergie

La cellule musculaire : une structure spécialisée dans son propre raccourcissement

→ Le cours p. 66

Question 45

Les muscles striés squelettiques :

☐ **A.** s'insèrent sur le squelette par l'intermédiaire des ligaments.
☐ **B.** s'insèrent sur le squelette par l'intermédiaire des tendons.
☐ **C.** sont responsables de l'orientation du mouvement du squelette.
☐ **D.** sont constitués d'une seule fibre musculaire.

Question 46

Les myofibrilles constituant les cellules musculaires sont constituées :

☐ **A.** de myofilaments fins d'actine.
☐ **B.** de myofilaments fins de myosine.
☐ **C.** de myofilaments épais d'actine.
☐ **D.** de myofilaments épais de myosine.

Question 47

Le raccourcissement du sarcomère, à l'origine de la contraction musculaire, se caractérise par :

☐ **A.** le glissement des myofilaments de myosine et d'actine les uns par rapport aux autres.
☐ **B.** le pivotement des têtes d'actine.
☐ **C.** le pivotement des têtes de myosine.
☐ **D.** la consommation d'ATP.

Question 48

Lors de la contraction musculaire, le pivotement des têtes de myosine permettant le glissement relatif de l'actine et de la myosine est déclenché par :

☐ **A.** l'hydrolyse de l'ATP en ADP et Pi.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

☐ **B.** la fixation de l'ATP par les têtes de myosine.
☐ **C.** le départ du phosphate inorganique des têtes de myosine.
☐ **D.** le départ de l'ADP des têtes de myosine.

Origine de l'ATP dans la cellule musculaire

→ Le cours p. 68

Question 49

La glycolyse :

☐ **A.** consiste en une oxydation complète du glucose.
☐ **B.** produit des composés R'.
☐ **C.** produit de l'ATP.
☐ **D.** produit 2 molécules de pyruvate par molécule initiale de glucose.

Question 50

La chaîne respiratoire est localisée :

☐ **A.** dans la matrice de la mitochondrie.
☐ **B.** dans le cytoplasme.
☐ **C.** dans la membrane mitochondriale interne.
☐ **D.** dans la membrane mitochondriale externe.

Question 51

Lors du cycle de Krebs :

☐ **A.** le glucose est décarboxylé.
☐ **B.** du CO_2 est produit.
☐ **C.** du $R'H_2$ est produit.
☐ **D.** de l'ATP est consommé.

Question 52

Au niveau de la chaîne respiratoire mitochondriale :

☐ **A.** de l'ATP est synthétisé par les ATP synthases.
☐ **B.** l'accepteur final des électrons parcourant la chaîne respiratoire est l'eau.
☐ **C.** des molécules de $R'H_2$ sont réoxydées en R'.
☐ **D.** de l'O_2 est produit.

Le contrôle des flux de glucose dans l'organisme

→ Le cours p. 70

Question 53

Les organes capables de libérer du glucose dans le sang à partir du glycogène stocké dans leurs cellules sont :

☐ **A.** le foie.
☐ **B.** les reins.
☐ **C.** les muscles.
☐ **D.** le cerveau.

Question 54

L'insuline :

☐ **A.** est produite par cellules α des îlots de Langerhans.
☐ **B.** est produite par cellules β des îlots de Langerhans.
☐ **C.** a une action hyperglycémiante.
☐ **D.** a une action hypoglycémiante.

Question 55

Le pancréas :

☐ **A.** détecte les variations de la glycémie.
☐ **B.** libère du glucose dans le sang.
☐ **C.** est le centre de commande du système de régulation de la glycémie.
☐ **D.** est l'organe effecteur du système de régulation de la glycémie.

Question 56

Les diabètes de type 1 et 2 se caractérisent par :

☐ **A.** une hypoglycémie chronique.
☐ **B.** une hyperglycémie chronique.
☐ **C.** des conséquences graves à long terme sur la santé.
☐ **D.** une baisse de la sensibilité des cellules à l'action de l'insuline.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Question 57

Le diabète de type 2 est une maladie :

☐ **A.** génétique.
☐ **B.** influencée par les facteurs environnementaux.
☐ **C.** que l'on sait soigner définitivement.
☐ **D.** dont la fréquence augmente de manière importante dans la population mondiale.

Comportements et stress : vers une vision intégrée de l'organisme

L'adaptabilité de l'organisme et ses limites

→ Le cours p. 84

Question 58

En cas de stress aigu, l'hormone sécrétée par la médullosurrénale est :

☐ **A.** le cortisol.
☐ **B.** l'adrénaline.
☐ **C.** la CRH.
☐ **D.** l'ACTH.

Question 59

Lors d'un stress aigu, le cortisol est secrété par :

☐ **A.** l'hypothalamus.
☐ **B.** l'hypophyse antérieure.
☐ **C.** la médullosurrénale.
☐ **D.** la corticosurrénale.

Question 60

Les effets du cortisol sont :

☐ **A.** l'inhibition de l'axe hypothalamo-hypophyso-corticosurrénalien.
☐ **B.** l'activation du système immunitaire.
☐ **C.** l'augmentation de la glycémie.
☐ **D.** la stimulation de la réaction inflammatoire.

Question 61

Les benzodiazépines ont un effet :

☐ **A.** anxiolytique.
☐ **B.** antidépresseur.
☐ **C.** sédatif.
☐ **D.** myorelaxant.

Question 62

Les benzodiazépines :

☐ **A.** ne doivent pas être associées à la consommation d'alcool.
☐ **B.** peuvent être prises sans avis médical.
☐ **C.** peuvent être prises de manière prolongée.
☐ **D.** entraînent des troubles de l'attention.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Génétique et évolution

Question 1 : B, C.
La méiose consiste en une suite de deux divisions successives, précédée d'une seule réplication de l'ADN (préalable indispensable à la première division). La méiose aboutit à la formation de gamètes haploïdes, chacune possédant la moitié de l'information génétique de la cellule initiale.

Question 2 : C.
Le brassage interchromosomique a lieu au cours de l'anaphase de première division de méiose, au cours de laquelle les chromosomes homologues de chaque paire se séparent et migrent aléatoirement vers un pôle ou l'autre de la cellule.

Question 3 : C, D.
Un crossing-over consiste en un échange réciproque et équilibré de fragments de chromatides appartenant chacune à l'un des deux chromosomes homologues. Les crossing-over ont lieu en prophase 1 et permettent le brassage intrachromosomique.

Question 4 : B, C, D.
Un crossing-over inégal aboutit à un échange déséquilibré d'information génétique entre deux chromosomes homologues. Les crossing-over inégaux sont des anomalies de la méiose, qui, dans certains cas, peuvent contribuer à enrichir le génome.

Question 5 : B, D.
Les transferts horizontaux de gènes chez les bactéries sont fréquents et s'effectuent selon des modalités variées (transformation, transduction et conjugaison bactérienne). Ces échanges participent à l'évolution de la diversité génétique bactérienne et contribuent à l'augmentation des phénomènes de résistance aux antibiotiques en santé humaine.

Question 6 : A, B, D.
Dans une population respectant les conditions de l'équilibre du modèle de Hardy-Weinberg, les fréquences alléliques et les fréquences génotypiques sont stables au cours des générations. La fréquence des individus homozygotes (A//A) est p^2, celles des individus homozygotes (B//B) est q^2 et celles des individus hétérozygotes (A//B) est 2pq. La somme des fréquences de ces 3 types d'individus est alors égale à 1 (car $p^2 + q^2 + 2pq = (p + q)^2 = 1^2 = 1$.

Question 7 : B, D.
La symbiose est une association à bénéfice réciproque entre deux individus d'espèces différentes : elle permet d'acquérir de nouveaux caractères et contribue donc à une diversification du vivant sans modification du génome.

Question 8 : A, B, C.
La diversification des êtres vivants peut se faire par modification du génome, comme lors de transferts horizontaux de gènes. Chez certaines espèces, on constate l'apparition de comportements nouveaux transmis ensuite de génération en génération sans modifications génétiques. Ces comportements nouveaux sont acquis par apprentissage. Des associations comme les symbioses permettent aussi l'acquisition de nouveaux caractères sans modification du génome.

À la recherche du passé géologique de notre planète

Question 9 : A, D.
La datation relative permet d'ordonner dans le temps plusieurs événements en utilisant quelques grands principes (de continuité, de superposition, de recoupement et d'inclusion), mais elle ne permet pas d'estimer précisément la date ou la durée d'un événement.

Question 10 : D.
D'après le principe de superposition, de deux couches superposées, la plus ancienne est celle qui est inférieure. Ce

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

principe, qui s'applique aux couches sédimentaires mais aussi aux coulées volcaniques, n'est pas valable quand les couches sont modifiées tectoniquement de manière importante, notamment lorsqu'elles sont inversées.

Question 11 : A, C.
Un bon fossile stratigraphique permet d'effectuer une datation relative des terrains étudiés. Pour cela, il doit présenter une durée de vie de l'espèce réduite, être abondant et posséder une large répartition géographique.

Question 12 : C, D.
Un radiochronomètre, caractérisé par son temps de demi-vie $t_{1/2}$, peut être utilisé pour un âge compris dans l'intervalle $[0{,}01t_{1/2} ; 10t_{1/2}]$. Ainsi, pour dater une roche dont l'âge est estimé en première approximation à 80 millions d'années, les radiochronomètres ^{235}U et ^{238}U peuvent être utilisés.

Question 13 : A.
Un cycle orogénique comprend trois phases : la sédimentation dans un bassin sédimentaire, l'orogénèse, c'est-à-dire la formation de la chaîne de montagnes caractérisée par un relief élevé, puis la disparition de ce relief.

Question 14 : C.
Au cours des temps géologiques, plusieurs cycles orogéniques se sont succédé en Europe : le cycle cadomien date du précambrien (de –750 à –540 Ma), tandis que le cycle calédonien date de la première partie de l'ère primaire (de –540 à –400 Ma), et que le cycle hercynien (ou varisque) a eu lieu lors de seconde partie de l'ère primaire (de –400 à – 250 Ma). Le cycle alpin est le cycle orogénique le plus récent : il a débuté il y a – 240 Ma, et se poursuit encore actuellement.

Question 15 : A, C, D.
Les ophiolites sont des lambeaux de lithosphère océanique affleurant en domaine continental et sont présentes dans les chaînes de collision. Elles sont mises en place lors d'un phénomène d'obduction.

Question 16 : A, D.
Une marge massive est une zone de transition entre une lithosphère océanique et une lithosphère continentale, au sein d'une même plaque, et ne présente pas d'activité sismique. Les marges passives se caractérisent par la présence des blocs basculés séparés par des failles normales.

De la plante sauvage à la plante domestiquée

Question 17 : B, D.
Les stomates, situés le plus souvent sur la face inférieure des feuilles, permettent l'entrée du CO_2 atmosphérique dans la plante en présence de lumière : ils sont donc indispensables à la photosynthèse.

Question 18 : B, C.
La sève brute est un liquide riche en eau et en ions minéraux, prélevés par les racines dans le sol. Elle circule dans les vaisseaux du xylème jusqu'aux autres organes de la plante.

Question 19 : A, C.
Un méristème est un tissu constitué de cellules indifférenciées qui se divisent activement par mitose, permettant de former de nouveaux tissus et organes.

Question 20 : A, B.
Les bourgeons abritent un méristème apical caulinaire, qui permet la croissance de la tige et la formation des feuilles. En climat tempéré, les bourgeons persistent durant l'hiver et se développent au printemps.

Question 21 : C.
Le chloroplaste est l'organite spécialisé dans la photosynthèse. La mitochondrie réalise la respiration cellulaire, tandis que la vacuole, présente dans les cellules végétales et celles des champignons, contient de l'eau et des substances dissoutes. Les lysosomes, présents uniquement dans les cellules animales, contiennent des enzymes hydrolytiques.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Question 22 : A, D.
La chaîne photosynthétique, située dans la membrane des thylakoïdes du chloroplaste, intervient lors de la phase photochimique, tandis que la phase chimique se déroule dans le stroma.

Question 23 : B, D.
Lors de la phase photochimique au niveau de la chaîne photosynthétique, l'oxydation de l'eau en O_2 s'accompagne d'une synthèse d'ATP et d'une réduction des composés R en RH_2.

Question 24 : A, B.
Lors de la phase chimique dans le stroma, la fixation du CO_2 atmosphérique selon le cycle de Calvin permet la synthèse de trioses-phosphates, grâce à l'hydrolyse de l'ATP et à l'oxydation de RH_2 en R, utilisant ainsi les molécules produites lors de la phase photochimique.

Question 25 : A, C.
La reproduction asexuée, qui repose sur la totipotence des cellules végétales, peut s'effectuer naturellement ou de manière artificielle, c'est-à-dire provoquée par l'Homme. Le bouturage est l'une des modalités de la reproduction asexuée. Les techniques de culture *in vitro* utilisent la reproduction asexuée des végétaux et sont utilisées à l'échelle industrielle.

Question 26 : A, C.
Les grains de pollen produits par les étamines sont les vecteurs des gamètes mâles et sont transportés par les insectes, par d'autres animaux, ou encore par des agents physiques comme l'eau ou le vent. La graine contenant l'embryon résulte de la fécondation de l'ovule par les gamètes mâles.

Question 27 : C.
Des collaborations entre les plantes et les animaux s'exercent lors de la pollinisation et la dissémination des graines.

Question 28 : A, D.
Les interactions mutualistes ont lieu entre deux individus appartenant à deux espèces différentes et se caractérisent par les bénéfices réciproques qu'en retire chacun d'eux.

Question 29 : B, D.
La sélection des plantes cultivées par l'Homme, qualifiée d'artificielle, a débuté par la domestication d'espèces sauvages et s'est poursuivie de manière empirique puis programmée, selon des modalités variées.

Question 30 : A.
L'hybridation consiste à croiser des variétés d'une même espèce afin d'obtenir des variétés nouvelles cumulant les caractéristiques des deux parents. Des hybridations sont également effectuées entre des individus d'espèces différentes pour obtenir une nouvelle espèce. Le génome d'une plante peut être modifié par d'autres techniques que l'hybridation.

Question 31 : A, C.
Les OGM sont des organismes génétiquement modifiés par génie génétique, soit par transgénèse, soit par édition du génome (comme la méthode CRISPR-Cas9 qui permet une modification génétique de petite taille). Les croisements forment de nouvelles variétés ou de nouvelles espèces, mais ne permettent pas d'obtenir des OGM.

Question 32 : D.
Une partie importante des semences utilisées dans le monde sont produites par des sociétés spécialisées (dont des entreprises de biotechnologie) qui les certifient. Les semences paysannes sont obtenues directement par les agriculteurs. La qualité de la semence est déterminante pour le résultat de la culture.

Les climats de la Terre : comprendre le passé pour agir aujourd'hui et demain

Question 33 : B.
Sur les 800 000 dernières années, les données préhistoriques, géologiques et

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

paléoécologiques mettent en évidence une alternance de périodes glaciaires et interglaciaires.

Question 34 : B, D.
Les facteurs astronomiques influençant le climat sont les variations de l'inclinaison de l'axe de rotation terrestre et les variations de la forme de l'orbite terrestre, ainsi que les variations de la position des équinoxes sur cette orbite.

Question 35 : A, D.
Au Crétacé, une forte activité magmatique au niveau des dorsales et des points chauds entraîne une augmentation de la concentration atmosphérique de CO_2 et donc de la température moyenne terrestre. De plus, l'absence de calottes polaires est responsable d'un faible albédo moyen terrestre, ce qui contribue à l'augmentation de la température terrestre.

Question 36 : A, C.
Au Permien-Carbonifère, la formation importante de roches carbonées (pétrole, charbon, gaz...), ainsi que l'altération de la chaîne de montagnes hercynienne consomment du CO_2 atmosphérique, entraînant une baisse de la température terrestre.

Comportements, mouvement et système nerveux

Question 37 : C.
Un réflexe myotatique déclenche un mouvement involontaire, et son centre nerveux se situe dans la moelle épinière. Il ne fait pas intervenir le cerveau. L'intensité du réflexe est variable et dépend de l'intensité du stimulus.

Question 38 : B, D.
Les neurones sensoriels véhiculent le message nerveux sensoriel, issu du muscle, vers le centre nerveux situé dans la moelle épinière. Ils passent par la racine dorsale de la moelle épinière et ont leur corps cellulaire localisé dans le ganglion rachidien de cette racine.

Question 39 : A, C.
Les neurones moteurs véhiculent le message nerveux moteur, issu de la moelle épinière vers le muscle, et cheminent par la racine ventrale de la moelle épinière.

Question 40 : A, D.
Le message nerveux, de nature électrique est constitué d'une succession de potentiels d'action qui se propagent le long de l'axone du neurone. L'intensité du message nerveux dans le neurone est codée en fréquence de potentiels d'action.

Question 41 : B, C, D.
Les cellules gliales assurent le bon fonctionnement des neurones (soutien mécanique, nutrition et stabilité du milieu extracellulaire).

Question 42 : D.
Du fait du contrôle controlatéral dû au croisement des voies motrices, un AVC affectant le cortex moteur droit entraîne une paralysie d'une région de la partie gauche du corps.

Question 43 : D.
Une lésion de la moelle épinière entraîne une paralysie de la partie du corps située en dessous de la lésion.

Question 44 : B, C.
La plasticité cérébrale, réorganisation des réseaux neuronaux par des modifications au niveau des synapses sous l'effet de stimuli environnementaux, a lieu durant toute la vie, mais est surtout intense durant l'enfance.

Produire le mouvement : contraction musculaire et apport d'énergie

Question 45 : B.
Les muscles striés squelettiques s'insèrent sur le squelette par l'intermédiaire des

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

tendons. La géométrie de l'articulation et la disposition des ligaments sont responsables de l'orientation du mouvement des os. Les muscles striés squelettiques sont constitués de plusieurs cellules ou fibres musculaires de grande taille, formées par la fusion de plusieurs cellules initiales.

Question 46 : A, D.
Les myofibrilles constituant les cellules musculaires sont constituées de myofilaments fins d'actine et de myofilaments épais de myosine.

Question 47 : A, C, D.
Lors du cycle de la contraction musculaire, qui consomme de l'ATP, le pivotement des têtes de myosine entraîne le glissement relatif des myofilaments de myosine et d'actine à l'origine du raccourcissement du sarcomère et donc de la contraction musculaire.

Question 48 : D.
Lors de la contraction musculaire, le départ de l'ADP des têtes de myosine déclenche le pivotement des têtes de myosine, permettant le glissement relatif de l'actine et de la myosine.

Question 49 : C, D.
La glycolyse produit 2 molécules de pyruvate et 2 molécules d'ATP par molécule initiale de glucose.

Question 50 : C.
La chaîne respiratoire est située au niveau des nombreux replis ou crêtes de la membrane mitochondriale interne.

Question 51 : B, C.
Le cycle de Krebs permet la décarboxylation du pyruvate, produit à partir du glucose lors de la glycolyse, en CO_2. Il produit des composés réduits $R'H_2$ et ne consomme pas d'ATP.

Question 52 : A, C.
Au niveau de la chaîne respiratoire mitochondriale, les molécules de $R'H_2$ sont réoxydées en R', et l'accepteur final des électrons ayant parcouru cette chaîne est l'O_2, réduit en H_2O. Au niveau des ATP synthases, le reflux de protons de l'espace intermembranaire vers la matrice permet la synthèse d'ATP.

Question 53 : A.
Seul le foie est capable de produire du glucose à partir de son stock de glycogène, pour le libérer dans le sang. Les autres organes peuvent hydrolyser leur glycogène en glucose mais ne l'utilisent que pour leur propre consommation.

Question 54 : B, D.
L'insuline est une hormone hypoglycémiante produite par les cellules β des îlots de Langerhans.

Question 55 : A, C.
Le pancréas est l'organe détectant les variations de la glycémie et commandant son système de régulation par la sécrétion de l'insuline (hormone hypoglycémiante) et du glucagon (hormone hyperglycémiante).

Question 56 : B, C.
Les diabètes de type 1 et 2 se caractérisent par une hyperglycémie chronique, dont les conséquences à long terme sur la santé sont graves. Seul le diabète de type 2 se caractérise par une baisse de la sensibilité des cellules à l'action hypoglycémiante de l'insuline.

Question 57 : B, D.
Le diabète de type 2 n'est pas une maladie génétique mais une maladie multifactorielle qui dépend de facteurs génétiques et environnementaux. La prévalence actuelle du diabète de type 2 augmente de manière importante dans la population mondiale.

Comportements et stress : vers une vision intégrée de l'organisme

Question 58 : B.
En cas de stress aigu, l'hormone sécrétée par la médullosurrénale est l'adrénaline.

Question 59 : D.
Lors d'un stress aigu, l'hypothalamus sécrète la CRH, qui stimule la sécrétion de l'ACTH par

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

l'hypophyse antérieure, activant la sécrétion de cortisol par la corticosurrénale.

Question 60 : A, D.
Le cortisol augmente la glycémie et inhibe le système immunitaire, notamment en diminuant les processus inflammatoires. De plus, le cortisol exerce un rétrocontrôle négatif sur l'axe hypothalamo-hypophyso-corticosurrénalien, en inhibant la sécrétion de CRH par l'hypothalamus et d'ACTH par l'hypophyse antérieure.

Question 61 : A, C, D.
Les benzodiazépines ont un effet anxiolytique, sédatif et myorelaxant, mais elles n'agissent pas en tant qu'antidépresseurs.

Question 62 : A, D.
Les benzodiazépines ont des effets secondaires, dont des troubles de l'attention. Elles ne doivent pas être associées à la consommation d'alcool, qui accroît leur effet sédatif. Elles ne peuvent être prises que sur avis médical et ne sont prescrites que sur ordonnance. Elles ne peuvent être prises de manière prolongée : leur prescription est limitée à 12 semaines maximum.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.